תוכן העניינים

הנושא	עמוד
פרק 1: סיכום החומר באלקטרוסטטיקה	1
בעיות באלקטרוסטטיקה	7
פתרון בעיות פרק 1	33
פרק 2: סיכום החומר בזרם, מתח, התנגדות ומעגלים חשמליים	63
בעיות בזרם, מתח, התנגדות ומעגלים חשמליים	67
פתרון בעיות פרק 2	96
פרק 3: סיכום החומר בקבלים	123
בעיות בקבלים	126
פתרון בעיות פרק 3	137
פרק 4: סיכום החומר במגנטיות	147
בעיות במגנטיות	154
פתרון בעיות פרק 4	177
פרק 5: סיכום החומר בהשראה מגנטית	201
בעיות בהשראה מגנטית	203
פתרון בעיות פרק 5	217
פרק 6: פתרונות בחינות הבגרות החל מ-2009 עד השאלון האחרון	231
נוסחאות ונתונים בפיזיקה	276

סיכום החומר באלקטרוסטטיקה

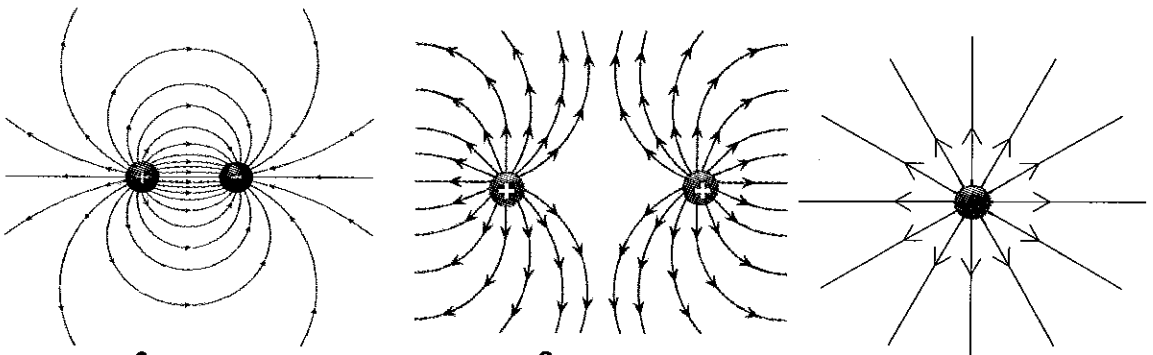
חוק קולון

1. הכוחות החשמליים הפועלים בין שני גופים טעונים 1 ו-2 הם זוג של כוחות פעולה ותגובה, השווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם. כוחות אלה מסומנים ב- $\vec{F}_{12}$ ו- $\vec{F}_{21}$. מתקיים: $\vec{F}_{12}=-\vec{F}_{21}$. יש לציין, שכוחות אלה תמיד שווים בגודלם אפילו אם המטענים על שני הגופים אינם שווים בגודלם.
2. חוק קולון, הוא חוק פיזיקלי המאפשר חישוב גודלו של הכוח החשמלי הפועל בין שני גופים נקודתיים טעונים. על פי חוק זה מתקיים שגודלו של הכוח החשמלי הפועל בין שני גופים נקודתיים טעונים, נתון על ידי: $F=k|q_1||q_2|/r^2$, כאשר q_1 הוא המטען של הגוף הנקודתי הראשון, q_2 הוא המטען של הגוף הנקודתי השני ו- r הוא המרחק בין שני הגופים.
3. יחידת המטען היא הקולון (C). הקולון היא כמות המטען החשמלי בה טעון כל אחד משני גופים נקודתיים, כך שבניהם פועל כוח חשמלי שגודלו $9\times10^9\,\mathrm{N}$ בהיותם מרוחקים 1 מטר זה מזה.
4. הגודל k שהוא קבוע הפרופורציה בחוק קולון נקרא קבוע קולון. גודלו של קבוע זה הוא: $k=9\times10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2}$.
5. לעתים רושמים את קבוע קולון בדרך הבאה: $k=\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ כאשר ε_0 הוא קבוע הנקרא "המקדם הדיאלקטרי של הריק": $\varepsilon_0=8.85\times10^{-12}\dfrac{\mathrm{C^2}}{\mathrm{N\cdot m^2}}$.

השדה החשמלי

1. השדה החשמלי הוא גודל פיזיקלי המבטא באופן כמותי את עוצמת ההשפעה של מטען המקור בנקודות שמסביב לו. גודל זה הוא גודל וקטורי שיש להגדיר לו שני מאפיינים: הגודל והכיוון.
2. את הכיוון של השדה החשמלי בנקודה מסוימת נקבע לפי ההסכם הבא: הוא בכיוון הכוח החשמלי השקול המופעל על מטען בוחן <u>חיובי</u> הנמצא בנקודה זו.
3. גודל השדה החשמלי בנקודה מסוימת מוגדר כגודל הכוח החשמלי המופעל על יחידת מטען בנקודה זו.
4. על פי הגדרה זו, כדי לקבוע את גודלו ואת כיוונו של השדה החשמלי בנקודה מסוימת, יש לשים בנקודה זו מטען בוחן חיובי q'. על מטען זה יפעל כוח חשמלי $\vec{F}_{q'}$ בכיוון מסוים. כיוון השדה בנקודה זו הוא בכיוון כוח זה, וגודלו (עוצמתו) של השדה החשמלי יהיה: $E=F_{q'}/q'$. על פי הגדרה זו יחידת השדה החשמלי היא: $[E]=\mathrm{N/C}$.
5. כאשר השדה נוצר ממטענים הנמצאים במנוחה הוא נקרא שדה חשמלי סטטי. שדה זה עשוי להשתנות מנקודה לנקודה, אבל הוא קבוע בגודלו ובכיוונו באותה נקודה ואינו משתנה עם הזמן. במקרה זה נאמר שהשדה החשמלי הוא "קבוע בזמן".
6. אם השדה החשמלי קבוע בזמן וגם במרחב, כלומר גודלו וכיוונו של השדה החשמלי הם קבועים בכל הנקודות במרחב, נאמר שהשדה החשמלי הוא "אחיד במרחב".
7. אם ידוע השדה החשמלי $\vec{E}$ בנקודה מסוימת (גודל וכיוון), נוכל לחשב את גודלו ואת כיוונו של הכוח החשמלי המופעל על מטען נקודתי q הנמצא בנקודה זו. גודלו של הכוח החשמלי המופעל על מטען זה הוא: $F=qE$, וכיוונו של הכוח החשמלי הוא בכיוון השדה החשמלי אם המטען הוא חיובי, ומנוגד לכיוון השדה החשמלי אם המטען הוא שלילי.

8. גודל השדה החשמלי E, הנוצר ממטען נקודתי q בנקודה הנמצאת במרחק r מהמטען, נתון על ידי הביטוי: $E=k|q|/r^2$. אם מטען המקור q הוא חיובי, כיוון השדה החשמלי יהיה רדיאלי החוצה ואם מטען המקור הוא שלילי, כיוון השדה החשמלי יהיה רדיאלי פנימה.
9. השדה החשמלי מקיים עיקרון ההרכבה: השדה החשמלי הנוצר בנקודה מסוימת מאוסף מטענים שווה לסכום הווקטורי של השדות הנוצרים בנקודה זו מכל אחד מהמטענים בנפרד.
10. קווי השדה החשמלי הם קווים דמיוניים אשר נמתחים מסביב למטענים החשמליים, המקיימים את התכונה שהם משיקים לוקטורי השדה החשמלי בנקודות שבהן קווים אלה עוברים. לפי זה, מתקבל שהמשיק לכל אחת מנקודות קו השדה מייצג את כיוון השדה החשמלי באותה נקודה.
11. קווי השדה החשמלי שמסביב <u>למטען נקודתי חיובי</u> הם קווים ישרים, בעלי סימטריה כדורית, המתחילים מהמטען ונמשכים עד אינסוף (תרשים 1). אם <u>המטען שלילי</u> אז קווי השדה נכנסים אל המטען. קווי השדה מסביב לשני מטענים נקודתיים חיוביים השווים בגודלם מתוארים בתרשים 2 וקווי השדה החשמלי שמסביב לשני מטענים נקודתיים הזהים בגודלם ומנוגדים בסימנם מתוארים בתרשים 3.



תרשים 1 תרשים 2 תרשים 3

12. מתקיים: כיוון קווי השדה החשמלי הוא מהמטען החיובי החוצה לאינסוף או כלפי מטען שלילי כלשהו שבסביבה. צפיפות קווי השדה החשמלי מסביב לאוסף מטענים נותנת אינדיקציה לגבי עוצמת השדה החשמלי; ככל שצפיפות קווי השדה החשמלי גדולה יותר, עוצמת השדה החשמלי גדולה יותר, וההפך. יש לציין שקווי השדה החשמלי אינם נחתכים.

<u>חוק גאוס</u>

1. חוק גאוס הוא קשר מתמטי המחבר בין השדה החשמלי למטען היוצר אותו. לכן הוא משמש לחישוב השדה החשמלי הנוצר על ידי מטענים שאינם בהכרח נקודתיים, כלומר מהתפלגויות שונות של מטען.
2. על סמך חוק גאוס מתקבלים החוקים הבאים לחישוב השדה החשמלי הנוצר מהגופים הטעונים הבאים:

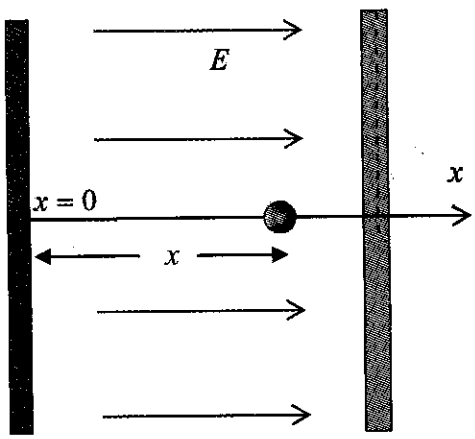
הגוף הטעון	השדה החשמלי
קליפה כדורית שהרדיוס שלה R וטעונה במטען q.	בתוך הקליפה $(0\le r<R)$: $E=0$. מחוץ לקליפה ועל פניה $(R\le r)$: $E=k\|q\|/r^2$. כיוון השדה רדיאלי החוצה אם המטען q חיובי ורדיאלי פנימה אם הוא שלילי.
כדור מוליך שהרדיוס שלו R וטעון במטען q.	בתוך הכדור $(0\le r<R)$: $E=0$. מחוץ לכדור ועל פניו $(R\le r)$: $E=k\|q\|/r^2$. כיוון השדה רדיאלי החוצה אם המטען q חיובי ורדיאלי פנימה אם הוא שלילי.

לוח "אינסופי" טעון במטען שצפיפותו המשטחית σ.	השדה הנוצר במקרה זה קבוע בגודל ובכיוון. גודלו בכל הנקודות נתון על ידי: $E=2\pi k\lvert\sigma\rvert=\lvert\sigma\rvert/2\varepsilon_0$ וכיוונו ניצב ללוח החוצה אם הלוח טעון במטען חיובי, וניצב ללוח פנימה אם הלוח טעון במטען שלילי.
שני לוחות "אינסופי" מקבילים, אחד טעון במטען שהצפיפות המשטחית שלו $+\sigma$ והשני $-\sigma$.	מחוץ ללוחות $E=0$. בין הלוחות $E=4\pi k\sigma=\sigma/\varepsilon_0$ כאשר השדה מכוון מהלוח החיובי אל הלוח השלילי.

3. מבחינת השפעה חשמלית, עבור הנקודות הנמצאות מחוץ לקליפה כדורית טעונה (או כדור מוליך טעון), ניתן להחליף את הקליפה הטעונה במטען נקודתי זהה הנמצא במרכז הקליפה.
4. עבור גופים מוליכים טעונים מתקיימות התכונות הבאות:
5. עודף המטען על גוף מוליך טעון מתפזר רק על משטחו החיצוני של הגוף ובייחוד בקצותיו החדים, אם יש כאלה.
6. השדה החשמלי בתוך הגוף המוליך הטעון הוא תמיד אפס.
7. השדה החשמלי על פני המוליך, ניצב לגוף המוליך בכל נקודותיו.
8. השדה החשמלי בתוך מוליך הנמצא בתוך שדה חשמלי חיצוני, תמיד אפס.
9. השדה החשמלי E קטן בתוך חומר מבדד. אם נתון שהשדה החשמלי בריק הוא E, ואם ממלאים את הריק בחומר מבדד, השדה E בתוך החומר קטן ונעשה $E'=E/\varepsilon_r$, כאשר ε_r הוא הקבוע הדיאלקטרי של החומר.
10. מתקיים שהקבוע הדיאלקטרי הוא גודל חסר יחידות. עבור הריק ובקירוב טוב גם באוויר מתקיים ש-$\varepsilon_r=1$. עבור שאר החומרים המבדדים $\varepsilon_r>1$. הקבועים הדיאלקטריים של חומרים מבדדים מתקבלים בעזרת ניסויים והם קבועים עבור אותם חומרים.

האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית

1. האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של חלקיק נקודתי טעון היא האנרגיה שחלקיק זה רוכש בהשפעת שדה חשמלי.
2. כאשר מניחים חלקיק טעון במטען q בנקודה מסוימת בשדה חשמלי, פועל עליו כוח חשמלי אשר יכול להאיץ אותו, כלומר להקנות לו אנרגיה. במילים אחרות, החלקיק הטעון רוכש אנרגיה בהשפעת שדה חשמלי. לאנרגיה זו קוראים "אנרגיה פוטנציאלית". ומכיוון שהמקור של אנרגיה זו הוא השדה החשמלי, היא נקראת "אנרגיה פוטנציאלית חשמלית". מסמנים אנרגיה זו בדרך כלל ב-U, אך יש שמסמנים אותה ב-E_p (Potential Energy).
3. האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של חלקיק נקודתי טעון הנמצא בשדה חשמלי אחיד נתונה על ידי הביטוי: $U(x)=-qEx$ כאשר q הוא מטען החלקיק, E השדה החשמלי ו-x הוא מיקום החלקיק ביחס למישור הייחוס $x=0$ (ראה תרשים).



4. לחישוב האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של חלקיק נקודתי טעון במטען q הנמצא בשדה חשמלי אחיד E, יש לבחור ציר קואורדינטות בכיוון השדה החשמלי או נגד כיוונו ולקבוע את קואורדינטת מישור הייחוס $x=0$. לאחר מכן יש להציב, במשוואה $U(x)=-qEx$, באופן הבא:

1) המטען q עם הסימן.

2) השדה החשמלי E עם הסימן, כלומר חיובי אם הוא מכוון בכיוון החיובי של הציר שבחרנו, ושלילי אם הוא מכוון בכיוון מנוגד לכיוון החיובי שבחרנו.

3) x חיובי או שלילי, בהתאם לבחירת כיוון הציר ומיקום מישור הייחוס.

11. מאחר והכוח החשמלי הוא כוח משמר, מתקיים חוק שימור האנרגיה עבור חלקיק נקודתי טעון הנע בין שתי נקודות בהשפעת שדה חשמלי אחיד: $\left(-qEx_1\right)+\frac{1}{2}mv_1^2=\left(-qEx_2\right)+\frac{1}{2}mv_2^2$.

12. האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של חלקיק נקודתי טעון במטען q' הנמצא בשדה החשמלי של מטען נקודתי q אחר נתונה על ידי הביטוי: $U(r)=kqq'/r$, כאשר r הוא המרחק בין שני המטענים הנקודתיים.

13. לגבי האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של מטען נקודתי בשדה של מטען נקודתי אחר יש לשים לב לדברים הבאים:

א. בחישוב האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית יש להציב את המטענים q_1 ו-q_2 כולל הסימן.

ב. מישור הייחוס לאנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של מטען נקודתי בשדה של מטען נקודתי אחר הוא האינסוף $(r=\infty)$.

ג. משמעות האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית במקרה זה היא העבודה שיש לבצע כנגד הכוח החשמלי בהבאת החלקיק שמטענו q' ממרחק אינסופי מהחלקיק שמטענו q (כלומר ממישור הייחוס), אל נקודה הנמצאת במרחק r ממנו.

ד. אם האנרגיה הפוטנציאלית של מערכת מטענים סטטית היא שלילית המערכת תהיה קשורה ואם היא חיובית המערכת לא קשורה.

14. מכיוון שהכוח החשמלי הוא כוח משמר, מתקיים חוק שימור האנרגיה עבור חלקיק נקודתי טעון אשר נע בשדה של חלקיק נקודתי טעון הקבוע במקומו. כלומר, בין כל שתי נקודות 1 ו-2 על מסלול התנועה של חלקיק טעון במטען q', אשר נע בהשפעת השדה החשמלי של חלקיק אחר הטעון במטען q ואשר <u>קבוע במקומו</u>, מתקיים:

$$\frac{1}{2}mv_1^2+k\frac{qq'}{r_1}=\frac{1}{2}mv_2^2+k\frac{qq'}{r_2}$$

כאשר m היא מסת החלקיק הנמצא בתנועה.

15. אם נתונה מערכת המורכבת משני חלקיקים a ו-b הטעונים במטענים q_a ו-q_b בהתאמה, ונתון ששני החלקיקים נמצאים בתנועה האחד ביחס לשני. חוק שימור האנרגיה עבור מערכת זו יהיה:

$$\frac{1}{2}m_av_{a1}^2+\frac{1}{2}m_bv_{b1}^2+k\frac{q_aq_b}{r_1}=\frac{1}{2}m_av_{a2}^2+\frac{1}{2}m_bv_{b2}^2+k\frac{q_aq_b}{r_2}$$

כאשר v_{a1} ו-v_{b1} הן המהירויות של החלקיקים a ו-b (בהתאמה) כשהמרחק ביניהם r_1, ו-v_{a2} ו-v_{b2} הן המהירות של החלקיקים כאשר המרחק ביניהם נהיה r_2. m_a היא מסת החלקיק a ו-m_b מסת החלקיק b.

16. האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של חלקיק נקודתי טעון במטען q' הנמצא בשדה חשמלי של קליפה כדורית הטעונה במטען q כאשר מרחק המטען הנקודתי ממרכז הקליפה הוא r, נתונה על ידי הביטוי:

$$U(r)=\begin{cases}\dfrac{kqq'}{R} & r<R\\[2ex] \dfrac{kqq'}{r} & r\geq R\end{cases}$$

כאשר R הוא רדיוס הקליפה.

הפוטנציאל החשמלי

1. הפוטנציאל החשמלי הוא גודל פיזיקלי הנגזר מהאנרגיה הפוטנציאלית החשמלית. הוא מוגדר באופן הבא: הפוטנציאל החשמלי בנקודה מסוימת הוא האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית ליחידת מטען בנקודה זו.
2. מסמנים את הפוטנציאל החשמלי באות V. כדי לחשב את הפוטנציאל החשמלי בנקודה P מסוימת, מניחים בנקודה זו מטען בוחן q', מחשבים או מודדים, אם אפשר, את האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית שלו בנקודה זו, $U_{q'}$. הפוטנציאל החשמלי יהיה: $V = U_{q'} / q'$.
3. הערות:
   א. הפוטנציאל החשמלי הוא גודל סקלרי.
   ב. יחידת הפוטנציאל החשמלי היא $\mathrm{J/C}$. יחידה זו נקראת "וולט" והיא מסומנת באות V.
   ג. אם בנקודה מסוימת שורר פוטנציאל של וולט אחד, אז לכל מטען בן קולון הנמצא בנקודה זו יש אנרגיה פוטנציאלית חשמלית של $1\mathrm{J}$.
   ד. אם בנקודה מסוימת שורר פוטנציאל שגודלו V וולטים, האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של מטען שגודלו q קולונים הממוקם בנקודה זו תינתן על ידי: $U_q = qV$.
4. הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות 2 ו-1, שהוא $(V_2 - V_1)$, נקרא מתח חשמלי בין נקודות אלה (Voltage). גודל זה מסומן ב- ΔV, או V_{21}. לעיתים מסתפקים באות V בלבד. יחידת המתח החשמלי הינה גם כן "וולט".
5. המתח החשמלי $V_2 - V_1$ מבטא את עבודת השדה החשמלי המושקעת בהעברת יחידת מטען (קולון אחד) מנקודה 2 אל נקודה 1. למשל, אם $V_2 - V_1 = 2\mathrm{Volt}$, המשמעות היא שהשדה החשמלי מבצע עבודה של $2\mathrm{J}$ בהעברת יחידת מטען של קולון אחד מנקודה 2 אל נקודה 1.
6. להלן חישוב הפוטנציאל החשמלי במקרים אחדים:

המקרה	הפוטנציאל	הערות
הפוטנציאל החשמלי בנקודה הנמצאת בשדה חשמלי אחיד	$V(x) = -Ex$	בוחרים ציר x מקביל לשדה, $x = 0$ על מישור הייחוס ומציבים את x ו- E כולל הסימן.
הפוטנציאל החשמלי בנקודה הנמצאת בשדה החשמלי של מטען נקודתי q.	$V(r) = \frac{kq}{r}$	מציבים את המטען כולל הסימן.
הפוטנציאל החשמלי בשדה של אוסף מטענים נקודתיים	$V = \frac{kq_1}{r_1} + \frac{kq_2}{r_2} + \cdots + \frac{kq_N}{r_N}$	
הפוטנציאל החשמלי בשדה של קליפה כדורית שרדיוסה R וטעונה במטען q.	$V(r) = \begin{cases} \frac{kq}{R} & r < R \\ \frac{kq}{r} & r \geq R \end{cases}$	שים לב שבתוך הקליפה הפוטנציאל קבוע.

7. חוק שימור האנרגיה של חלקיק טעון הנע במסלול כלשהו בין שתי נקודות 1 ו-2 תחת השפעת שדה חשמלי בלבד הוא: $E_{K1} + qV_1 = E_{K2} + qV_2$, כאשר V_1 ו- V_2 הם הפוטנציאלים החשמליים בנקודות 1 ו-2 בהתאמה.
8. עבור שדה חשמלי אחיד מתקיים הקשר הבא בין השדה החשמלי ובין הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות 1 ו-2 בשדה זה: $V_2 - V_1 = -E(x_2 - x_1)$. בקשר זה בוחרים ציר x מקביל לקווי

השדה, $x=0$ על מישור הייחוס ומציבים השדה ו- x כולל הסימן.

9. מהקשר האחרון מתקבל ש- $E=-\frac{V_2-V_1}{x_2-x_1}=-\frac{\Delta V}{\Delta x}$.

10. מתקיימות התכונות הבאות:

א. השדה החשמלי מכוון תמיד מהפוטנציאל החשמלי הגבוה אל הפוטנציאל החשמלי הנמוך.

ב. מאחר והמטענים החיוביים נעים בכיוון השדה החשמלי והשליליים נגד כיוונו, נקבל שהמטענים החיוביים נעים מפוטנציאל חשמלי גבוה אל פוטנציאל חשמלי נמוך, והשליליים נעים מפוטנציאל חשמלי נמוך אל פוטנציאל חשמלי גבוה.

ג. התנאי לתנועת מטענים חשמליים בין שתי נקודות הוא קיום שדה חשמלי בין שתי נקודות אלה שמשפיע על המטענים, וזה גורר קיום הפרש פוטנציאלים בין נקודות אלה.

ד. אם באזור מסוים הפוטנציאל קבוע, מתקבל ש- $E=0$ ולכן לא תיווצר תנועת מטענים באזור זה.

11. אם נחבר באמצעות חוט מוליך שני גופים מוליכים טעונים אשר הפוטנציאל החשמלי שלהם שונה, אלקטרונים חופשיים ינועו מהגוף בעל הפוטנציאל החשמלי הנמוך אל הגוף בעל הפוטנציאל החשמלי הגבוה. תנועה זו נמשכת עד לרגע שבו הפוטנציאל החשמלי של שני הגופים משתווה.

12. משטח (או קו) שווה פוטנציאל הוא משטח (או קו) שהפוטנציאל החשמלי בכל נקודותיו קבוע. מההגדרה יוצא שתנועה של מטען חשמלי לאורך מסלול על משטח שווה פוטנציאל אינה דורשת עבודה.

13. <u>משטחים שווי פוטנציאל מסביב למטען נקודתי</u> הם משטחים כדוריים שהמרכז שלהם נמצא במטען.

14. <u>משטחים שווי פוטנציאל בשדה חשמלי אחיד</u> הם מישורים מקבילים הניצבים לשדה החשמלי.

15. להלן מספר תכונות של משטחים שווי פוטנציאל:

א. המתח החשמלי בין כל שתי נקודות על אותו משטח שווה פוטנציאל הוא אפס.

ב. העבודה החשמלית שיש להשקיע כנגד הכוח החשמלי כדי להעביר חלקיק טעון במטען q, מנקודה אחת הנמצאת על משטח שווה פוטנציאל אל נקודה אחרת על אותו משטח, היא אפס.

ג. השדה החשמלי ניצב למשטח שווה הפוטנציאל בכל נקודותיו.

16. עבור גוף מוליך טעון מתקיימות התכונות הבאות בהקשר לפוטנציאל:

א. הפוטנציאל החשמלי בכל הנקודות הנמצאות על פני הגוף המוליך הטעון שווה, כלומר פני הגוף המוליך הטעון הם משטח שווה פוטנציאל.

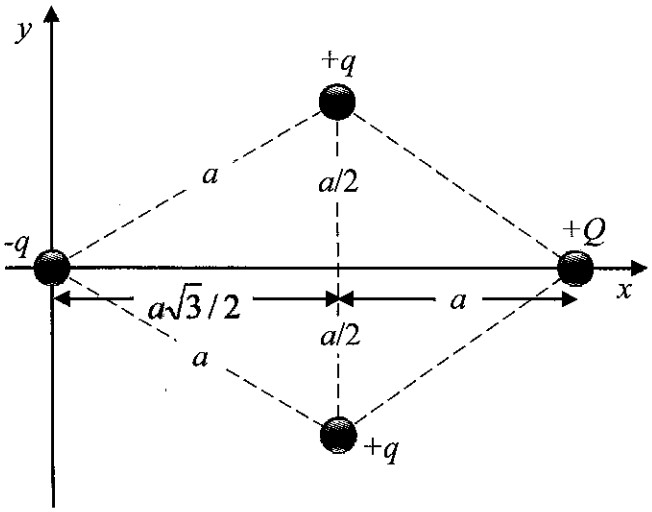
ב. הפוטנציאל החשמלי בכל הנקודות בתוך גוף מוליך טעון הוא קבוע ושווה לערכו על פני הגוף המוליך.

פרק 1 – בעיות באלקטרוסטטיקה

הערה: לפעמים, במקום לומר "חלקיק נקודתי טעון" משתמשים במונח "מטען נקודתי". כמובן, אין מטענים חשמליים שאינם נמצאים על גופים או חלקיקים. יש רק חלקיקים נושאי התכונה שקוראים לה מטען. לכן כאשר משתמשים במונח "מטען נקודתי" הכוונה היא לגוף נקודתי טעון.

בעיה 1/ פרק 1

בתרשים שלפניך מוצגים ארבעה מטענים, הקבועים בארבעת הקודקודים של דלתון שממדיו מופיעים בתרשים. גם הגדלים של המטענים מופיעים בתרשים, כאשר q ו-Q הם גדלים חיוביים.



א. הוסף לתרשים חיצים המתארים את הכוחות החשמליים המופעלים על המטען $+Q$ על ידי שאר המטענים.

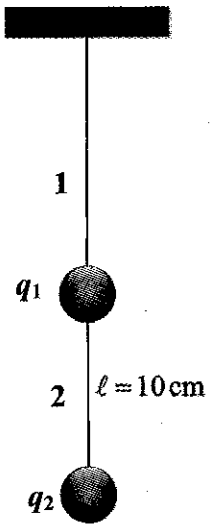
ב. בטא, באמצעות נתוני השאלה המוצגים בתרשים, את:

(1) כל אחד מהכוחות החשמליים אליהם התייחסת בסעיף הקודם.

(2) את הכוח החשמלי השקול המופעל על המטען $+Q$, וקבע מהו כיוונו של כוח זה.

בעיה 2/ פרק 1

קושרים כדור קטן לתקרת המעבדה בבית הספר באמצעות חוט מבדד (החוט 1 בתרשים). קושרים לכדור זה חוט נוסף (2) מבדד גם הוא, ולקצה השני שלו קושרים כדור שני, הזהה לראשון. טוענים את שני הכדורים במטענים זהים: $q_1 = q_2 = 4\times10^{-7}\,\text{C}$.



נתון שמסות שני הכדורים זהות, $20\,\text{g}$ כל אחת, שמסת החוטים זניחה ושאורך החוט 2 הוא $\ell = 10\,\text{cm}$.

א. חשב את הכוחות החשמליים (גודל וכיוון) שכל כדור מפעיל על האחר.

ב. האם המתיחות בחוט 1 תלויה בגודלם של המטענים שעל שני הכדורים? הסבר תשובתך.

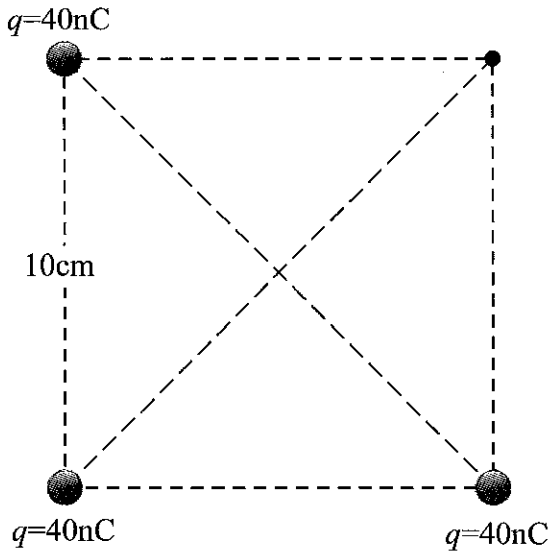
ג. האם המתיחות בחוט 2 תלויה בגודלם של המטענים שעל שני הכדורים? הסבר תשובתך.

ד. חשב את המתיחות בשני החוטים.

ה. נתון כעת כי $q_1 = 4\times10^{-7}\,\text{C}$. מה צריך להיות גודלו וסימנו של המטען q_2 כדי שהמתיחות בחוט 2 תתאפס?

בעיה 3/ פרק 1

שלושה מטענים נקודתיים חיוביים זהים, גודלו של כל אחד מהם $40\,\text{nC}$, קבועים בשלושה קודקודים של ריבוע שאורך צלעו $10\,\text{cm}$ (ראה תרשים).



א. הגדר את המושג "שדה חשמלי", והסבר כיצד קובעים את הכיוון שלו בנקודה מסוימת

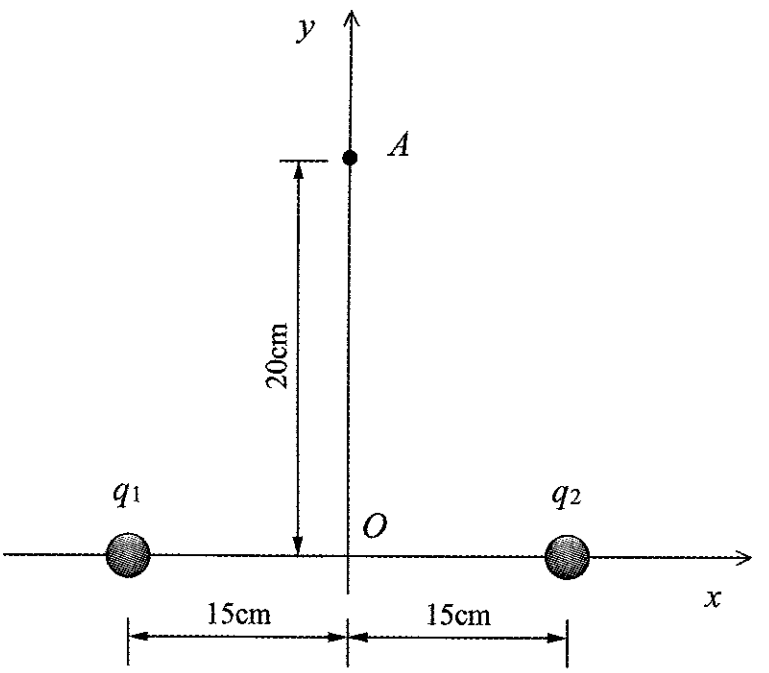
ב. חשב את גודלו ואת כיוונו של השדה החשמלי השקול שיוצרים שלושת המטענים הנתונים בקודקוד הרביעי.

ג. חשב את גודלו ואת כיוונו של הכוח החשמלי השקול, הפועל על מטען נקודתי q' שנניח בקודקוד הרביעי של הריבוע אם נתון ש- $q' = -40\,\text{nC}$.

ד. מהו גודלו וסימנו של המטען החשמלי q'' שיש להניח במרכז הריבוע, כך שהכוח החשמלי השקול הפועל על המטען שבסעיף הקודם יתאפס?

בעיה 4/ פרק 1

נתונים שני מטענים נקודתיים קבועים בשתי נקודות שונות על ציר x במערכת הצירים xy המתוארת בתרשים. המטען הראשון q_1 נמצא בנקודה $(-15\,\text{cm},0)$, והמטען השני, q_2, נמצא בנקודה $(15\,\text{cm},0)$. נתון: $q_1 = q_2 = +2\,\text{nC}$.



א. האם קיימת נקודה לאורך ציר x שבה השדה החשמלי השקול הנוצר על ידי שני המטענים מתאפס? הסבר תשובתך.

ב. האם קיימת נקודה לאורך ציר x שבה הפוטנציאל הנוצר על ידי שני המטענים מתאפס? הסבר תשובתך.

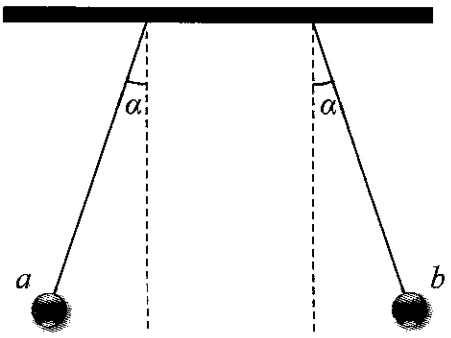
ג. חשב את השדה החשמלי השקול הנוצר על ידי שני המטענים בנקודה $A:(0,20\text{cm})$.

ד. חשב את המהירות (גודל וכיוון) שיש להקנות לאלקטרון הנמצא בנקודה A, שתגרום לו לנוע בתנועה מעגלית בהשפעת הכוח החשמלי השקול המופעל עליו על ידי שני המטענים q_1 ו-q_2?

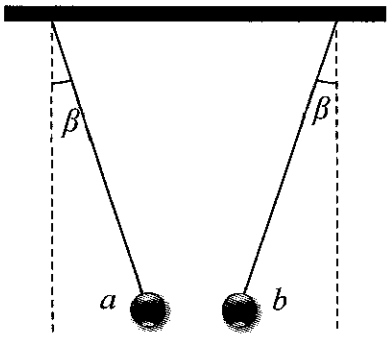
בעיה 5/ פרק 1

בתרשים א' מתוארים שני כדורים קטנים וטעונים a ו-b שלהם אותה מסה ואותו רדיוס, התלויים מהתקרה בשתי נקודות שונות באמצעות שני חוטים מבדדים שאורכם זהה ומסתם זניחה.

נתון כי כתוצאה מכוחות חשמליים הפועלים בין שני הכדורים, נוצרות בין שני החוטים והאנך שתי זוויות זהות שגודל כל אחת מהן α (ראה תרשים א').



תרשים א'



תרשים ב'

א. נתון כי הכדור a טעון במטען חיובי $+q$.

1) האם כדור b בהכרח טעון? אם כן קבע מהו סימנו של מטען זה, אם לא הסבר מדוע.

2) קבע האם המטען על כדור b שווה בהכרח למטען על כדור a? הסבר קביעתך.

ב. נתון כעת כי בין הכדור a ובין הכדור b פועלים כוחות משיכה חשמליים, וכתוצאה מכך נוצרות בין כל חוט לאנך זוויות זהות שגודל כל אחת מהן β (כפי שמתואר בתרשים ב'). נתון גם כי כדור a טעון במטען חיובי $+q$.

1) קבע מהו סימנו של המטען על הכדור b. הסבר תשובתך.

2) האם המטענים על שני הכדורים a ו-b בהכרח שווים בערכם המוחלט? הסבר את תשובתך.

3) תלמיד טוען כי כדור b בתרשים ב' אינו בהכרח טעון. האם התלמיד צודק בטענתו? הסבר.

ג. במקרה אחר נתון כי מסתו של הכדור b בתרשים א' גדולה פי שניים ממסתו של כדור a. האם הזוויות בין כל אחד משני החוטים לאנך תהיינה כעת שוות? הסבר.

בעיה 6/ פרק 1

שלושה מטענים נקודתיים זהים, קבועים בשלושת הקודקודים של משולש שווה צלעות שאורך כל אחת מהן הוא 0.2m, כמתואר בתרשים א'. גודלו של כל אחד משלושת המטענים הוא $q=4\mu\text{C}$.

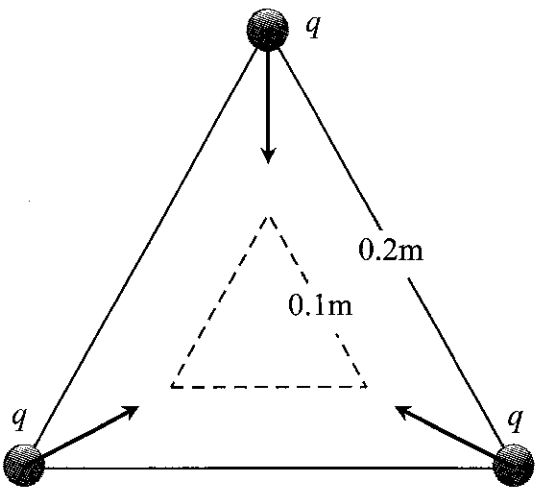
א. חשב את האנרגיה הפוטנציאלית הכוללת של מערכת המטענים המתוארת בתרשים א', והסבר מהי המשמעות הפיזיקלית של התשובה המתקבלת.

ב. חשב את האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של אחד המטענים המתוארים בתרשים א' בהשפעת שני המטענים האחרים, והסבר מהי המשמעות הפיזיקלית של התשובה המתקבלת.

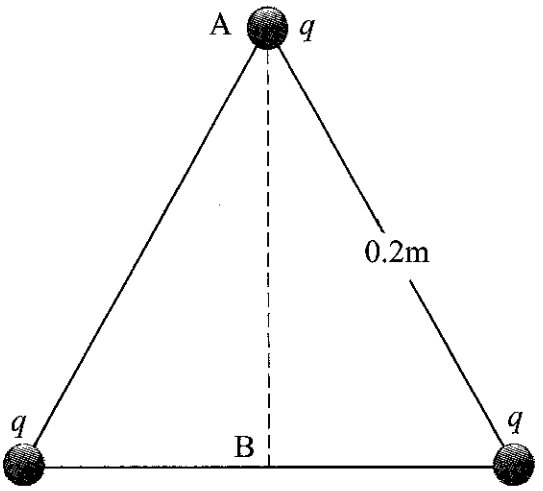
ג. חשב את העבודה שיש להשקיע כנגד הכוח החשמלי, כדי להעביר את אחד המטענים המתוארים

בתרשים א' ממקומו אל מרכזה של הצלע הנמצאת מולו (למשל מהנקודה A אל הנקודה B בתרשים א').

ד. חשב את העבודה שהשדה החשמלי מבצע כאשר מקרבים את שלושת המטענים זה לזה עד למחצית המרחק ההתחלתי ביניהם, כפי שמתואר בתרשים ב'.



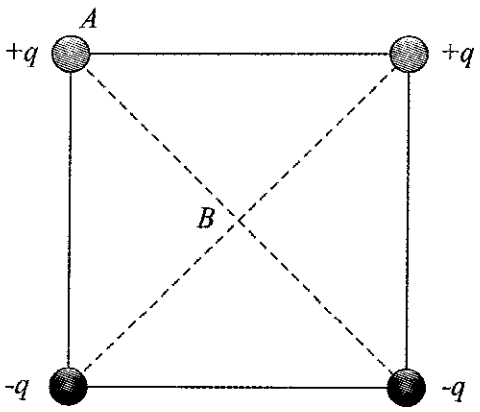
תרשים ב'



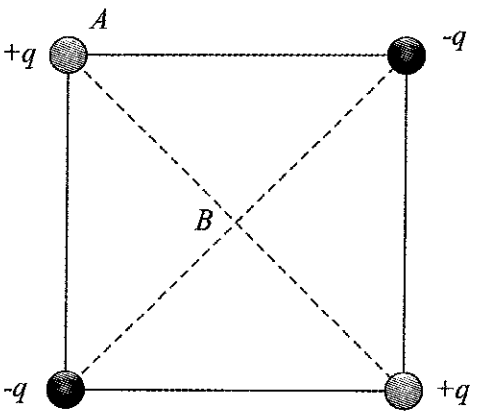
תרשים א'

בעיה 7/ פרק 1

בשני התרשימים א' ו-ב' שלפניך מתוארים מטענים הקבועים בקודקודים של שני ריבועים זהים, שאורך הצלע של כל אחד מהם הוא a. כל המטענים שווים בערכם המוחלט, q כל אחד מהם, כאשר q הוא גודל חיובי. סימניהם של המטענים מתוארים בתרשימים.



תרשים ב



תרשים א

א. מצא את השדה החשמלי השקול במרכזו של כל אחד משני הריבועים. בטא את תשובתך באמצעות נתוני השאלה.

ב. מצא את הפוטנציאל החשמלי במרכזו של כל אחד משני הריבועים. בטא את תשובתך באמצעות נתוני השאלה.

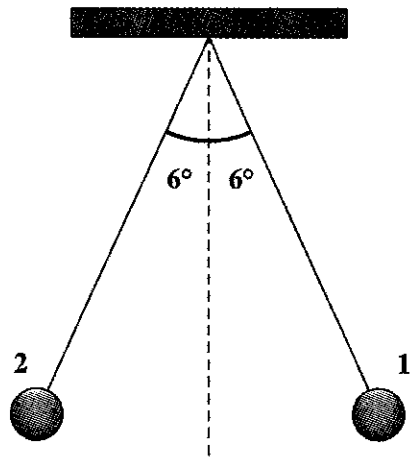
ג. מצא את העבודה שיש לבצע כנגד הכוח החשמלי, בכל אחד משני המקרים, כדי להעביר את אחד המטענים החיוביים ממקומו אל מרכז הריבוע. בטא את תשובתך באמצעות נתוני השאלה.

ד. מצא את האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית הכוללת של המטענים בכל אחד משני המקרים המתוארים בתרשימים א' ו-ב'. בטא את תשובתך באמצעות נתוני השאלה.

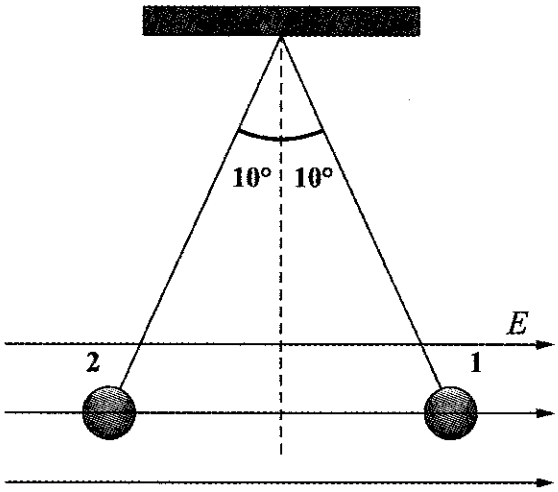
ה. קבע באיזה משני המקרים המתוארים בתרשימים א' ו-ב' המטענים "קשורים" יותר. הסבר את תשובתך.

בעיה 8/ פרק 1

לאותה נקודה בתקרת המעבדה קושרים שני חוטים מבדדים שאורכם זהה. לכל אחד משני החוטים מחובר כדור קטן. נתון כי שני הכדורים זהים ומסת כל אחד מהם $m=0.1\text{g}$. טוענים את שני הכדורים, וכתוצאה מכך נוצרות בין החוטים לאנך זוויות זהות, 6° כל אחת, כפי שמתואר בתרשים א'.



תרשים א



תרשים ב

נתון שאורך כל אחד משני החוטים הוא $\ell=20\text{cm}$ ושמסתם זניחה.

א. מה אפשר להסיק בנוגע לגודלם ולסימנם של המטענים על שני הכדורים? הסבר.

ב. חשב את המטען על כל אחד משני הכדורים, אם נתון שהמטען על הכדור 1 בתרשים א' גדול פי שניים מהמטען על הכדור 2.

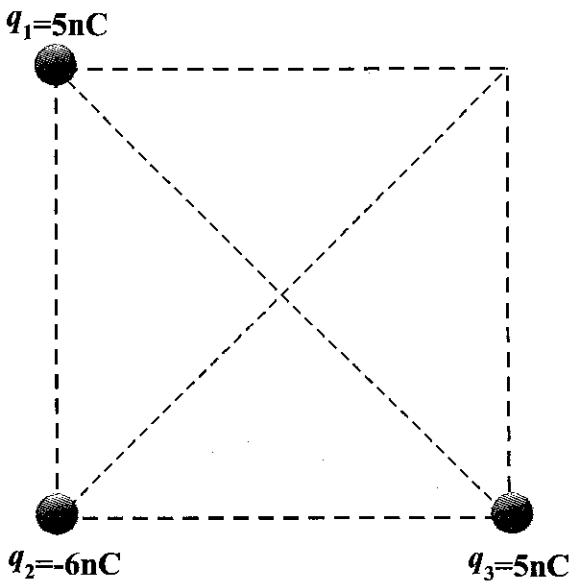
כעת טוענים את שני הכדורים מחדש במטענים שונים (כשהם עדיין קשורים לחוטים), ולאחר מכן מפעילים עליהם שדה חשמלי אופקי אחיד שעוצמתו $E=10^5\,\text{N/C}$, כפי שמתואר בתרשים ב'. כתוצאה מכך נוצרות בין כל אחד משני החוטים לאנך זוויות זהות, 10° כל אחת.

ג. מה אפשר להסיק בנוגע לגודלם וסימנם של המטענים על שני הכדורים? הסבר תשובתך.

ד. חשב את גודלו של המטען על כל אחד משני הכדורים במצב המתואר בתרשים ב'.

בעיה 9/ פרק 1

שלושה מטענים נקודתיים q_1, q_2 ו- q_3 קבועים בשלושת הקודקודים של ריבוע כמתואר בתרשים שלפניך. נתון: $q_1=q_3=5\text{nC}$, $q_2=-6\text{nC}$ ואורך צלע הריבוע $a=10\text{cm}$.



א. חשב את העבודה שיש לבצע כנגד הכוח החשמלי, כדי להרחיק את המטענים עד למרחק אינסופי זה מזה.

ב. קבע, על סמך התשובה שקיבלת בסעיף א', האם המערכת היא קשורה או לא.

ג. חשב את העבודה שיש לבצע כנגד הכוח החשמלי, כדי להעביר את המטען q_2

ממקומו למרכז הריבוע.

ד. חשב את גודל המטען שיש להניח בקודקוד הרביעי של הריבוע, כדי שהפוטנציאל החשמלי במרכז הריבוע יתאפס.

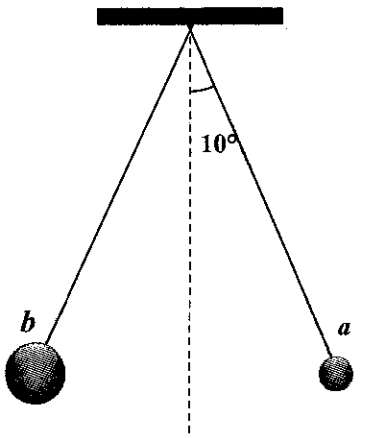
ה. חשב את גודל המטען שיש להניח בקודקוד הרביעי של הריבוע, כדי שהשדה החשמלי השקול במרכז הריבוע יתאפס במקרה המתואר בתרשים.

בעיה 10/ פרק 1

טוענים שני כדורים מוליכים a ו-b על ידי חיבורם אל אותו מקור מתח. כתוצאה מכך הפוטנציאל על כל כדור נעשה V, שהוא גודל חיובי. נתון שמסת כל אחד משני הכדורים היא 2g, ושרדיוס הכדור b גדול פי שניים מרדיוס הכדור a $(R_b = 2R_a)$.

א. בטא, באמצעות נתוני השאלה, את המטען על כל אחד משני הכדורים, וחשב את היחס בין מטענים אלה.

לאחר שטוענים את שני הכדורים, תולים אותם מאותה נקודה בתקרה באמצעות שני חוטים מבדדים בעלי אורך זהה, 30cm כל אחד. כתוצאה מהדחייה החשמלית בין שני הכדורים נוצרת בין החוט הקשור לכדור a ובין האנך זווית של 10°, כפי שמתואר בתרשים.



ב. חשב את הזווית הנוצרת בין החוט השני לאנך.

ג. חשב את גודלו של המטען על כל אחד משני הכדורים.

ד. נתון כעת כי $m_a \neq m_b$. האם אפשר למצוא יחס בין q_a ל-q_b, שעבורו הזוויות בין כל אחד משני החוטים לאנך שוות? הסבר תשובתך.

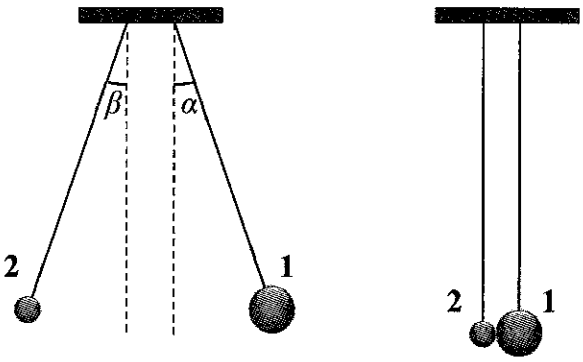
בעיה 11/ פרק 1

שני כדורים מוליכים 1 ו-2 תלויים משתי נקודות שונות בתקרה באמצעות שני חוטים מבדדים בעלי אורך זהה, כך ששני הכדורים נוגעים זה בזה, ומרכזיהם נמצאים באותו גובה כפי שמתואר בתרשים א'.

נתון שרדיוס הכדור 1 הוא $R_1 = 1\text{cm}$, ורדיוס הכדור 2 הוא $R_2 = 0.5\text{cm}$. מסות שני הכדורים שוות $m_2 = m_1 = 8\text{g}$. נתון שלפני המגע בין שני הכדורים, כדור 1 היה טעון במטען חיובי $q_1 = 6\times10^{-8}\,\text{C}$ ושהכדור 2 היה ניטרלי.

לאחר המגע בין שני הכדורים נוצרת ביניהם דחייה. כתוצאה מכך, נוצרת בין החוט הראשון לאנך זווית α ובין החוט השני לאנך נוצרת זווית β, כפי שמתואר בתרשים ב'.

א. חשב את המטען על כל אחד משני הכדורים לאחר המגע, בהנחה שהמטען מתפזר על פני שני



תרשים ב תרשים א

הכדורים באופן אחיד למרות כוחות הדחייה החשמליים.

ב. קבע מהו הקשר בין הזוויות α ו-β. הסבר תשובתך.

ג. חשב את הזוויות α ו-β, אם נתון שהמרחק בין מרכזי הכדורים, במצב המתואר בתרשים ב', הוא 3cm.

ד. חשב אורכו של כל אחד משני החוטים.

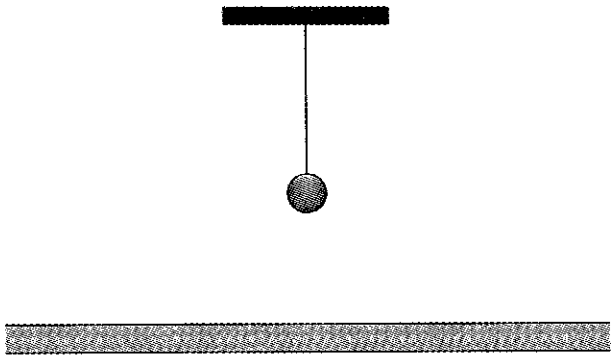
ה. חשב את עבודת הכוח החשמלי המתבצעת כאשר מקרבים את שני הכדורים מהמצב המתואר בסעיף הקודם עד למצב שבו שניהם נוגעים מחדש זה בזה (בהנחה שהתפלגות המטען על שני הכדורים נשארת אחידה).

בעיה 12/ פרק 1

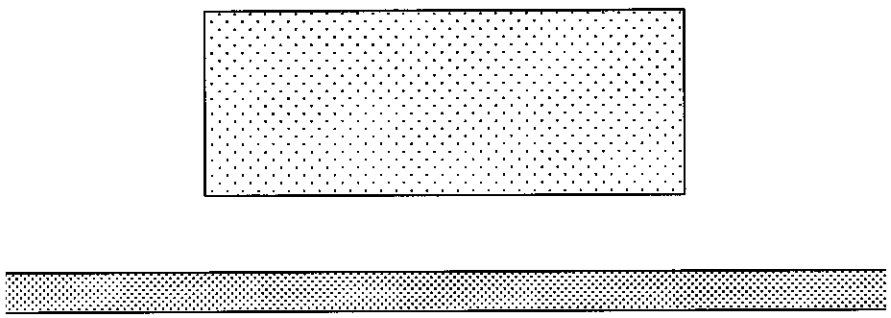
נתון לוח "אינסופי" דק ואופקי, הטעון במטען המפוזר עליו באופן אחיד. נתון שהצפיפות המשטחית של המטען על הלוח היא $\sigma = +5.5\times10^{-9}\ \text{C/m}^2$.

א. חשב את גודלו ואת כיוונו של השדה החשמלי שהלוח יוצר.

ב. קושרים כדור קטן, טעון, שמסתו 2g לקצה חוט דק מבדד שמסתו זניחה, ואת הקצה השני שלו קושרים לתקרה, כך שהכדור נמצא מעל הלוח כפי שמתואר בתרשים שלפניך. מה צריך להיות המטען על הכדור כדי שהמתיחות בחוט תתאפס?



ג. מניחים כעת לוח "אינסופי" עבה, מוליך וניטרלי מעל הלוח הטעון ובמקביל לו, כפי שמתואר בתרשים שלפניך:



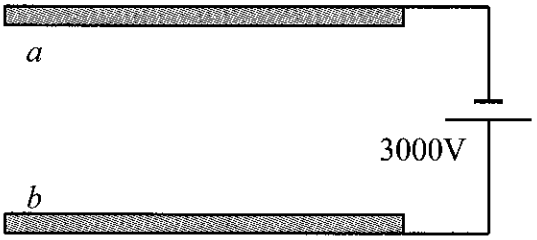
1) תאר מה יקרה למטענים החשמליים בלוח העבה בהשפעת השדה החשמלי הנוצר על ידי הלוח הטעון, וקבע מהו גודל השדה החשמלי בתוך לוח זה?

2) חשב את הצפיפות המשטחית של המטען על כל אחד משני צדי הלוח העבה.

3) חשב את הכוח החשמלי השקול שמפעיל במצב זה הלוח הדק על הלוח העבה.

בעיה 13/ פרק 1

שני לוחות דקים, מוליכים ומקבילים, a ו- b, מחוברים למקור מתח כפי שמתואר בתרשים שלפניך. המרחק בין שני הלוחות הוא $10\,\text{cm}$. מקור המתח יוצר בין שני הלוחות הפרש פוטנציאלים שגודלו $3000\,\text{V}$.



כידוע, מערך כזה המורכב משני לוחות המחוברים לקטביו של מקור מתח נקרא קבל.

א. קבע מי מבין שני הלוחות נמצא בפוטנציאל גבוה יותר. הסבר.

ב. הסבר מהי המשמעות הקביעה שהפרש הפוטנציאלים בין שני הלוחות הוא $3000\,\text{V}$.

ג. חשב את גודלו ואת כיוונו של השדה החשמלי בין שני הלוחות.

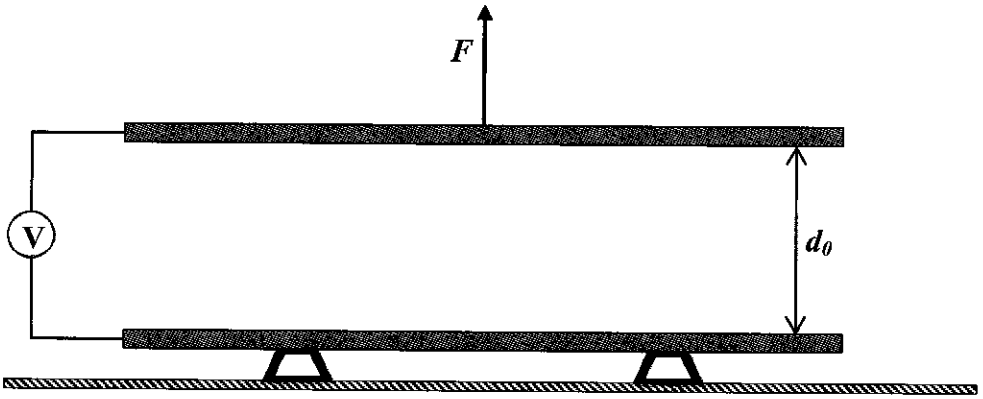
מתחילים לקרב בהדרגה את שני הלוחות זה לזה. נתון שהאוויר נהייה מוליך כאשר ערך השדה החשמלי דרכו גדול מ- $3\times10^6\,\text{N/C}$.

ד. חשב לאיזה מרחק מינימלי ניתן לקרב את הלוחות לפני שיתחיל מעבר אלקטרונים בניהם (מצב זה נקרא פריצה של הקבל).

ה. במצב של "פריצת" הקבל, קבע מאיזה לוח נפלטים האלקטרונים, העליון או התחתון בתרשים, וחשב את מהירות הפגיעה שלהם בלוח האחר.

בעיה 14/ פרק 1

נתונים שני לוחות מוליכים ומקבילים, ששטח כל אחד מהם $0.8\,\text{m}^2$ הנמצאים במרחק d_0 זה מזה. מחברים את שני הלוחות למקור מתח היוצר בניהם הפרש פוטנציאלים שגודלו V_0, כך שהלוח העליון נמצא בפוטנציאל הגבוה. לאחר מכן **מנתקים** את הלוחות ממקור המתח ומרחיקים את הלוח העליון מהלוח התחתון תוך כדי מדידת המתח V בין הלוחות כפונקציה של תוספת המרחק Δd ביחס ל- d_0 (ראה תרשים).



תוצאות המדידה נתונות בטבלה הבאה:

$\Delta d\,(\text{cm})$	2	4	6	8	10
$V\,(\text{V})$	24	28	32	36	40

א. שרטט גרף המתאר את תוצאות הניסוי (V כפונקציה של Δd).

ב. מצא על סמך חוקי הפיזיקה את הקשר המתמטי בין המתח (V) שבין שני הלוחות ותוספת המרחק ביניהם (Δd).

ג. היעזר בגרף ששרטטת בסעיף א' ובקשר המתמטי שקיבלת בסעיף ב', וחשב את:

1) גודלו וכיוונו של השדה החשמלי בין הלוחות.

2) המטען על כל אחד משני הלוחות.

3) המתח ההתחלתי בין שני הלוחות, V_0.

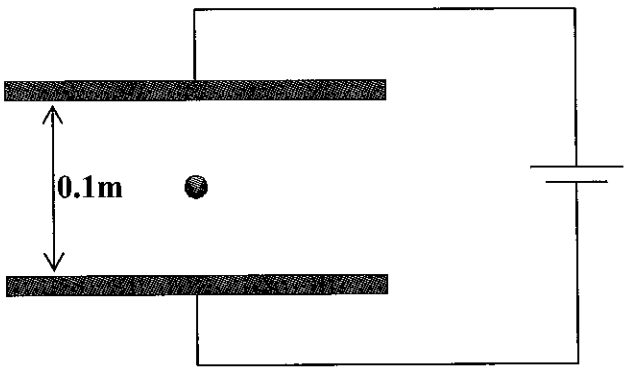
4) המרחק ההתחלתי בין שני הלוחות, d_0.

ד. חשב את הכוח החשמלי (גודל וכיוון) שמפעיל כל אחד משני הלוחות על הלוח האחר כאשר המרחק ביניהם היה d_0.

ה. חשב את העבודה שיש להשקיע כנגד הכוח החשמלי, כדי להרחיק את הלוחות ממרחק d_0 ועד שהמרחק ביניהם יהיה $3d_0$.

בעיה 15/ פרק 1

פיזיקאי עורך את הניסוי הבא: הוא משחרר טיפת שמן טעונה בתוך החלל שבין שני לוחות מוליכים, אופקיים ומקבילים המחוברים למקור מתח (ראה תרשים), כך שהלוח העליון נמצא בפוטנציאל יותר גבוה מהלוח התחתון. המרחק בין שני הלוחות הוא 0.1m. נתון שממדי הלוחות גדולים מאוד ביחס למרחק ביניהם.



מתוך ניסויים רבים, גילה הפיזיקאי כי כדי לשמור על טיפת השמן במנוחה, עליו להפעיל בין שני הלוחות מתח שגודלו $800\,\text{V}$. נתון שמסת טיפת השמן היא $4\times10^{-6}\,\text{kg}$.

א. חשב את השדה החשמלי (גודל וכיוון) בין שני הלוחות. פרט חישוביך.

ב. חשב את גודלו של המטען הנמצא על טיפת השמן וקבע מהו סימנו.

ג. הפיזיקאי משחרר את טיפת השמן בנקודה הנמצאת במרחק קטן מאוד מהלוח השלילי (הלוח התחתון), כאשר המתח נשאר $800\,\text{V}$.

1) חשב את האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של טיפת השמן ביחס ללוח הנמצא מעליה (הלוח החיובי).

2) האם טיפת השמן תישאר במנוחה או תתחיל לנוע לעבר הלוח שמעליה? הסבר את תשובתך.

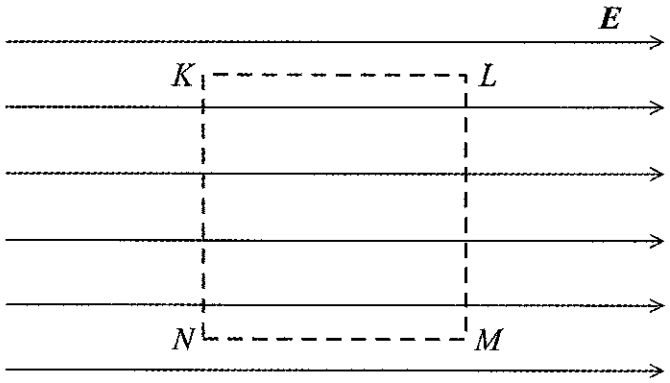
ד. כעת הפיזיקאי מניח את טיפת השמן בנקודת האמצע שבין שני הלוחות, כאשר המתח עדיין $800\,\text{V}$, ולאחר מכן הוא מקטין את המתח ל- $400\,\text{V}$.

1) תאר את תנועתה של טיפת השמן.

2) חשב את מהירות ההתנגשות של טיפת השמן בלוח שבו היא פוגעת.

בעיה 16/ פרק 1

בתרשים שלפניך מתוארים קווי שדה חשמלי אחיד שעוצמתו $1,000\,\mathrm{N/C}$. בשדה זה מסומנות ארבע נקודות: K, L, M ו- N אשר יוצרות ריבוע שאורך צלעו $20\,\mathrm{cm}$. נתון שהצלע KL של הריבוע מקביל לקווי השדה.



א. חשב את העבודה שיש לבצע כנגד הכוח החשמלי, כדי להעביר מטען נקודתי $q = 2\times10^{-6}\,\mathrm{C}$ מהנקודה N אל:

1) הנקודה K.
2) הנקודה M.
3) הנקודה L.

ב. חשב את הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות:

1) N ו- K.
2) N ו- M.
3) N ו- L.

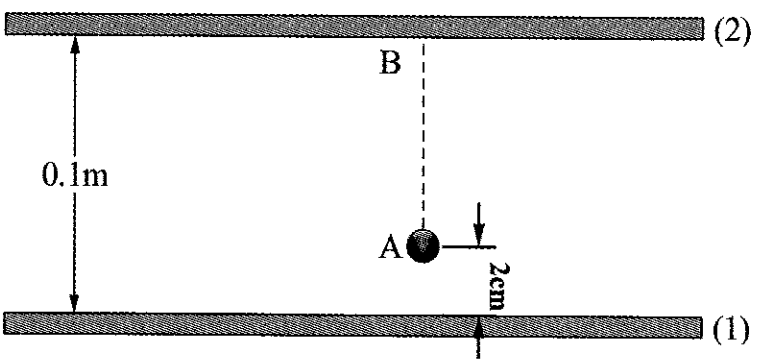
ג. מנקודה מסוימת, הנקודה 1, יורים אלקטרון בכיוון קווי השדה החשמלי במהירות שגודלה $7\times10^{6}\,\mathrm{m/s}$. חשב את העתק האלקטרון עד לעצירתו הרגעית בנקודה שנסמן ב-2.

ד. חשב את הפרש הפוטנציאלים בין הנקודה 1, ממנה נורה האלקטרון, ובין הנקודה 2 שבה האלקטרון נעצר רגעית.

ה. חשב את זמן תנועת האלקטרון מהנקודה 1 ועד לעצירתו הרגעית בנקודה 2.

בעיה 17/ פרק 1

נתונים שני לוחות מקבילים, לוח 1 ולוח 2, הטעונים במטענים הפוכים. מהנקודה A, הנמצאת בין שני הלוחות, משחררים ממנוחה חלקיק טעון (ראה תרשים).



כתוצאה מפעולת הכוח החשמלי החלקיק נע לעבר הלוח העליון ומתנגש בו בנקודה B.

נתון: מטען החלקיק חיובי וגודלו $q=4\text{nC}$, מסת החלקיק $2\times10^{-10}\text{kg}$, המרחק בין שני הלוחות הוא 10cm, מרחק הנקודה A מהלוח התחתון 2cm (ראה תרשים) והמהירות שבה החלקיק מתנגש בנקודה B היא 200m/s.

א. קבע מי מבין שני הלוחות הוא חיובי ומי שלילי. הסבר את קביעתך.

ב. חשב את הפרש הפוטנציאלים בין שתי הנקודות A ו-B (V_B-V_A).

ג. חשב את גודלו ואת כיוונו של השדה החשמלי בין שני הלוחות.

ד. חשב את הפרש הפוטנציאלים בין שני הלוחות.

ה. חשב את הצפיפות המשטחית של המטען, על כל אחד משני הלוחות, אם ידוע שכמות המטען על שני הלוחות שווה בערכה המוחלט.

ו. כעת מעבירים את החלקיק אל נקודה כלשהיא C על הלוח העליון, ומקנים לו מהירות התחלתית שגודלה 180m/s לעבר הלוח התחתון ובכיוון הניצב לו. החלקיק מגיע עד לנקודה מסוימת בין הלוחות, נקודה שנסמן ב-D, ונעצר בה רגעית. חשב את:

1) הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות C ו-D (V_{CD}).

2) מרחק הנקודה D מהנקודה C.

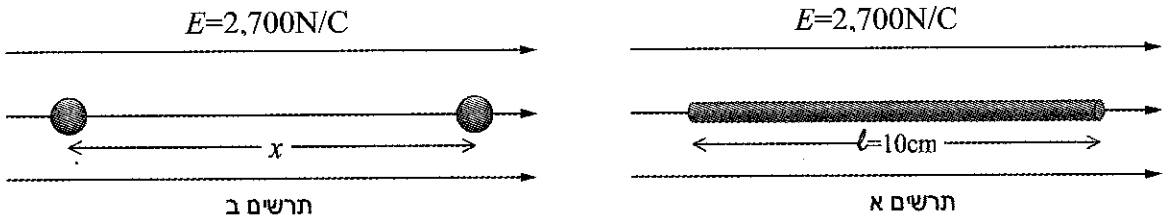
בעיה 18/ פרק 1

באזור בו קיים שדה חשמלי אחיד E מניחים מוט מוליך במקביל לקווי השדה כפי שמתואר בתרשים א'. נתון שאורך המוט הוא $\ell=10\text{cm}$ ועוצמת השדה החשמלי $E=2700\text{N/C}$.

א. תאר מה קורה למטענים במוט כתוצאה מהשדה החשמלי E.

ב. חשב את גודל המטען שמצטבר בשני קצוות המוט.

ג. במקום המוט, מניחים כעת שני מטענים $q_1=5\text{nC}$ ו-$q_2=-5\text{nC}$ באותו שדה חשמלי אחיד, כך שהם נמצאים על אותו קו שדה חשמלי במרחק x זה מזה כמתואר בתרשים ב'. נתון ששני המטענים נמצאים במצב שווי משקל אלקטרוסטטי.



1) קבע מי מבין שני המטענים (תרשים ב') הוא q_1, ומי q_2.

2) חשב את המרחק x.

3) חשב את העבודה שיש להשקיע כנגד הכוחות החשמליים על מנת להעביר את המטען שמצד ימין ממיקומו עד למחצית המרחק שלו מהמטען האחר.

בעיה 19/ פרק 1

נתון לוח דק וגדול מאוד (אינסופי) הניצב לפני הקרקע, וטעון במטען חיובי המפוזר עליו באופן אחיד. בקרבת הלוח מונח מוט מוליך AB על משטח אופקי חלק מבדד. המוט מונח במצב מאונך ללוח וקשור בצדו המרוחק מהלוח לקיר באמצעות חוט מבדד שמסתו זניחה(ראה תרשים).

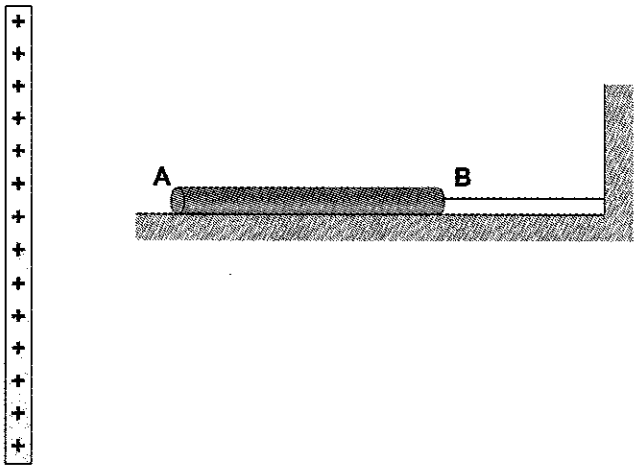
נתון שאורך המוט $\ell=10\text{cm}$, ושהצפיפות המשטחית של המטען על הלוח $\sigma=4\text{nC/m}^2$.

א. חשב את גודל השדה החשמלי הנוצר על ידי הלוח וקבע את כיוונו.

ב. חשב את כמות המטען המצטברת על קצוות המוט כתוצאה מהקיטוב של המטען.

ג. חשב את המתיחות בחוט.

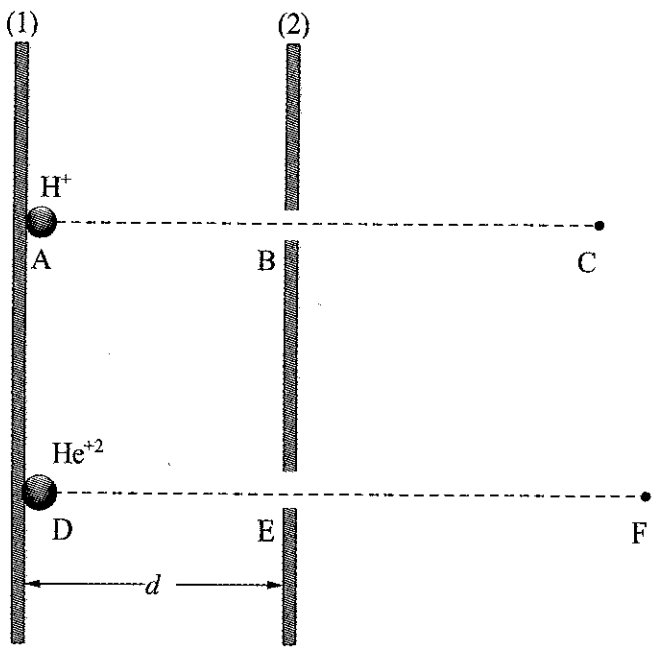
ד. נניח שמקרבים כעת את המוט אל הלוח, כך שנוצר מגע בינו לבין הלוח; תאר בקצרה מה יקרה למוט.



בעיה 20/ פרק 1

מאיצים יון מימן H^+ (כלומר פרוטון) ויון הליום He^{+2} (שהוא גרעין המורכב משני פרוטונים ושני נויטרונים), בין שני לוחות 1 ו-2 המקבילים זה לזה והנמצאים במרחק d האחד מן השני כפי שמתואר בתרשים שלפניך. הלוחות מחוברים למקור מתח שיוצר ביניהם הפרש פוטנציאלים שגודלו V_0. יון המימן מתחיל לנוע מנקודה A על הלוח 1, ויון ההליום מתחיל לנוע מנקודה D על אותו לוח. הנח שבין שני היונים אין השפעה הדדית במהלך תנועתם. כאשר שני היונים מגיעים ללוח השני, כל אחד מהם עובר דרך פתח קטן לעבר צדו השני של לוח 2. יון המימן יוצא מפתח B ואילו יון ההליום יוצא מפתח E (ראה תרשים).

כתוצאה מנוכחותו של שדה חשמלי מחוץ ללוחות, יון המימן ממשיך לנוע לאורך אותו קו ישר אך בתאוטה, עד שהוא נעצר רגעית בנקודה C, הנמצאת במרחק $d/2$ מהפתח B.



א. קבע מי מבין שני הלוחות 1 או 2 נמצא בפוטנציאל יותר גבוה. הסבר קביעתך.

ב. בטא באמצעות נתוני השאלה את מהירותו של כל אחד משני היונים כאשר הוא מגיע ללוח השני

(הלוח 2), וחשב את היחס בין מהירויות אלה.

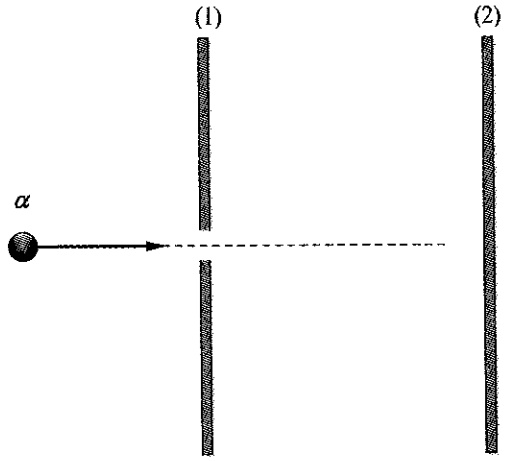
ג. בטא את הפרש הפוטנציאלים V_{BC} באמצעות הגודל V_0.

ד. מצא את השדה E_2 מחוץ ללוחות. בטא את תשובתך באמצעות הגדלים V_0 ו-d.

ה. מצא את מרחק הנקודה F, שבה נעצר רגעית יון ההליום, מהנקודה E. בטא תשובתך באמצעות הגודל d.

בעיה 21/ פרק 1

חלקיק α נכנס אל החלל שבין שני לוחות מקבילים, 1 ו-2, דרך פתח קטן הנמצא בלוח 1, ובכיוון הניצב ללוח זה (ראה תרשים). נתון שמהירות החלקיק ברגע כניסתו דרך הפתח היא $10^5\,\mathrm{m/s}$, הפרש הפוטנציאלים בין שני הלוחות הוא $200\,\mathrm{V}$ והמרחק ביניהם הוא $2\,\mathrm{m}$.



כתוצאה מהכוח החשמלי המופעל על חלקיק ה-α על ידי הלוחות הטעונים, הוא ממשיך לנוע בתאוטה לאורך קו תנועתו ונעצר רגעית בנקודה מסוימת בין הלוחות.

א. קבע איזה מבין שני הלוחות נמצא בפוטנציאל גבוה. הסבר את קביעתך.

ב. חשב את גודלו ואת כיוונו של השדה החשמלי שבין הלוחות.

ג. בחר את מישור הייחוס על הלוח 1, וחשב את הפוטנציאל בנקודה שבה חלקיק α נעצר עצירה רגעית.

ד. חשב את המרחק בין הנקודה שבה חלקיק ה-α נעצר רגעית ובין הלוח 1.

ה. חשב את גודל המהירות המינימלית שצריכה להיות לחלקיק ה-α בכניסתו מהפתח, כדי שיוכל לפגוע בלוח 2.

בעיה 22/ פרק 1

פרוטון וחלקיק α, שיש להם אותה אנרגיה קינטית, נכנסים בזמן $t=0$ אל תחום בו קיים שדה חשמלי אחיד E.

נתון שכיוון תנועתם של הפרוטון ושל חלקיק ה-α הוא נגד כיוון השדה החשמלי, ונתון שהם רחוקים זה מזה, כך שאין השפעה הדדית ביניהם.

ידוע שמסת חלקיק α היא $4m_p$ ומטענו $2e$, כאשר m_p היא מסת הפרוטון ו-e מטענו.

א. חשב את היחס בין מהירות הפרוטון ובין מהירות חלקיק ה-α ברגע כניסתם אל השדה החשמלי.

ב. חשב את היחס בין הכוח החשמלי המופעל על הפרוטון ובין הכוח החשמלי המופעל על חלקיק ה-α במהלך תנועתם תחת השפעת השדה החשמלי.

ג. חשב את היחס בין תאוצת הפרוטון לתאוצת חלקיק ה- α.

ד. חשב את היחס בין העתקי הפרוטון וחלקיק ה- α מרגע כניסתם לשדה החשמלי ועד לעצירתו הרגעית של כל אחד מהם.

ה. חשב את היחס בין הזמנים עבור הפרוטון וחלקיק ה- α מרגע כניסתם לשדה החשמלי ועד לרגע עצירתם הרגעית של כל אחד מהם.

בעיה 23/ פרק 1

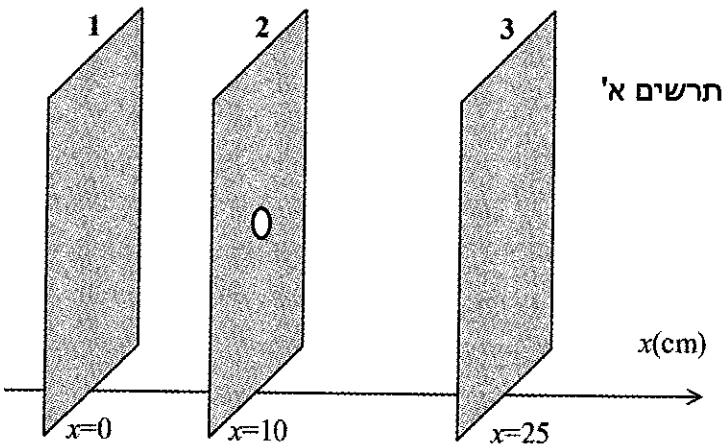
בתרשים א' מתוארים שלושה לוחות מוליכים, מקבילים וטעונים, הניצבים לציר x. לוח 1 עובר בנקודה $x=0$, לוח 2 בנקודה $x=10\text{cm}$, ולוח 3 עובר בנקודה $x=25\text{cm}$. הגרף בתרשים ב' מתאר את הפוטנציאל בין הלוחות כפונקציה של x.

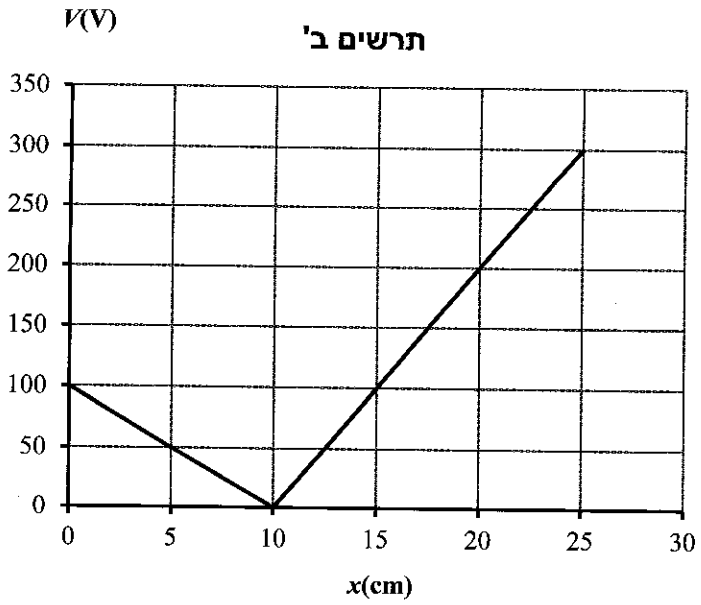
א. חשב את גודלו ואת כיוונו של השדה החשמלי בין הלוחות.

ב. חשב את גודל המהירות המינימלית שיש להקנות לאלקטרון הנמצא במרכז לוח 1 כדי שיגיע ללוח 2.

ג. האלקטרון ממשיך מלוח 2, דרך פתח קטן הנמצא בו, לעבר לוח 3. חשב את מהירות הפגיעה של האלקטרון בלוח 3.

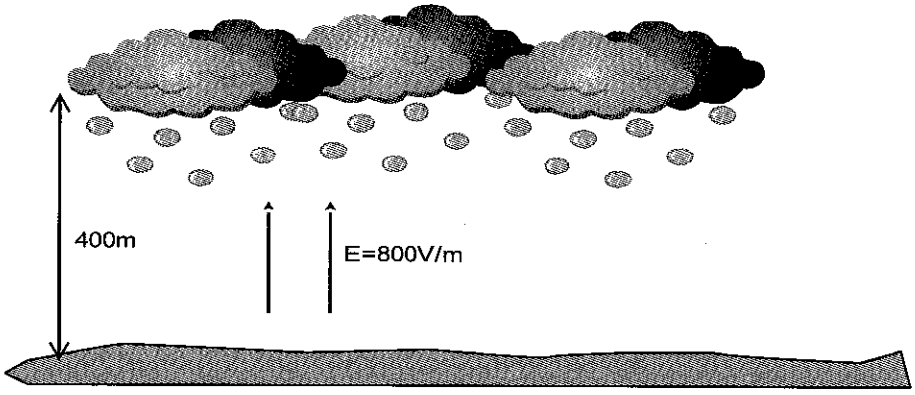
ד. משחררים ממנוחה פרוטון בסמוך ללוח 1, והוא נע בתאוצה לעבר לוח 2. האם הוא יצליח להגיע ללוח 3? אם השבת "כן", חשב את מהירות הפגיעה שלו בלוח זה, ואם השבת "לא" מצא באיזו נקודה הוא נעצר רגעית.





בעיה 24/ פרק 1

נתון כי בין ענן מסוים והקרקע שורר שדה חשמלי אחיד שעוצמתו $800\,\mathrm{V/m}$, וכיוונו ניצב לפני הקרקע כלפי מעלה. נתון שגובה הענן מעל פני הקרקע הוא $400\,\mathrm{m}$ (ראה תרשים).



א. הסבר מהי משמעות המשפט: "בין הענן והקרקע שורר שדה חשמלי אחיד שעוצמתו $800\,\mathrm{V/m}$".

ב. קבע את:

1) סימן המטען על הענן.

2) התייחס לענן כאל לוח דק שהשטח שלו הוא $2.2\times10^5\,\mathrm{m}^2$, וחשב את גודלו של המטען על הענן.

ג. חשב את הפרש הפוטנציאלים בין הענן לקרקע, וקבע היכן הפוטנציאל הגבוה, על פני הקרקע או על הענן.

ד. כתוצאה מנפילת טיפות מים מהענן הן נטענות. הנח כי אחת הטיפות ממשיכה ליפול במהירות קבועה. מסת טיפה זו היא $m=0.01\,\mathrm{g}$. בהנחה שכוח החיכוך עם האוויר זניח:

1) קבע מהו סימן המטען על טיפה זו.

2) קבע מהו גודל המטען על טיפה זו.

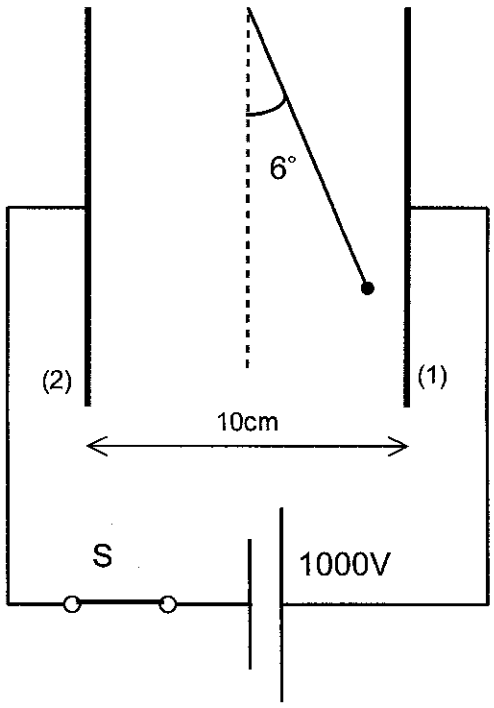
ה. בשלב מסוים הענן מתחיל להנמיך ולנוע לכיוון הקרקע, עד שהוא מגיע לגובה של $200\,\mathrm{m}$. בהנחה שהמטען על הענן אינו משתנה קבע מי מבין הגדלים הבאים משתנה ומי לא. עבור הגדלים שמשתנים חשב את היחס בין הגודל החדש לקודם:

1) עוצמת השדה החשמלי בין הקרקע לענן.

2) הפרש הפוטנציאלים בין הקרקע לענן.

בעיה 25/ פרק 1

נתונים שני לוחות 1 ו-2 המקבילים והניצבים לפני הקרקע (ראה תרשים). הלוחות מחוברים למקור מתח באמצעות מפסק S. לוח 1 מחובר לקוטב החיובי של מקור המתח, ולוח 2 מחובר לקוטב השלילי שלו. בין הלוחות נמצא כדור קטן טעון שמסתו $0.05\,\mathrm{g}$. הכדור תלוי מנקודה קבועה באמצעות חוט מבדד שמסתו זניחה. כאשר סוגרים את המפסק S, נוצר בין שני הלוחות הפרש פוטנציאלים שגודלו $1000\,\mathrm{V}$, וכתוצאה מכך נוצרת זווית של 6° בין החוט לאנך (ראה תרשים).



נתון שהמרחק בין הלוחות הוא $10\,\text{cm}$, וממדי הלוחות גדולים מאוד ביחס למרחק ביניהם כך שניתן להתייחס לשדה החשמלי ביניהם כאחיד.

א. חשב את עוצמת השדה החשמלי בין הלוחות וקבע מהו כיוונו.

ב. קבע מהו סימן המטען החשמלי על הכדור. הסבר את קביעתך.

ג. חשב את גודלו של המטען על הכדור.

ד. הסבר אם וכיצד תשתנה הזווית אם מרחיקים את הלוחות זה מזה, כאשר:

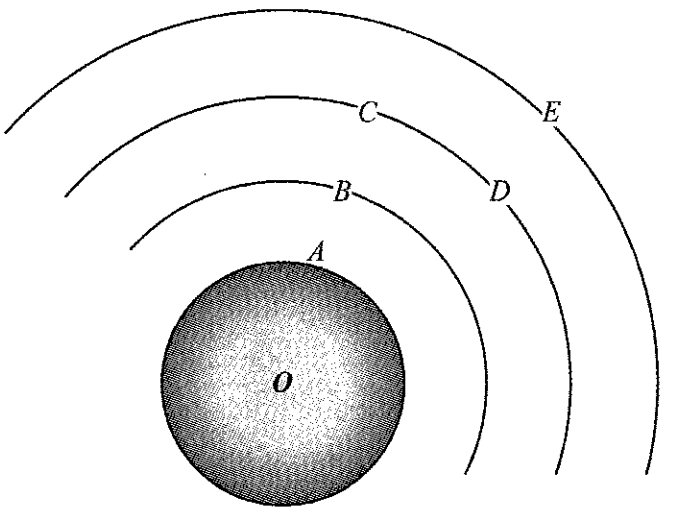
1) המפסק סגור (הלוחות עדיין מחוברים למקור המתח).

2) פותחים את המפסק, ולאחר מכן מרחיקים את הלוחות.

בעיה 26/ פרק 1

נתון כדור מוליך טעון. הפוטנציאל על פניו הוא $18,000\,\text{V}$ ורדיוסו $R = 6\,\text{cm}$.

בתרשים הבא מתוארים חתכים של משטחים שווי פוטנציאל סביב הכדור. נתון: $V_B = 15,000\,\text{V}$, $V_C = 12,000\,\text{V}$ ו- $V_E = 9,000\,\text{V}$.



א. חשב את המטען של הכדור ותאר את התפלגותו.

ב. חשב את העבודה שיש להשקיע כנגד הכוח החשמלי כדי להעביר מטען $q = 10^{-6}\,\text{C}$ בין הנקודות הבאות:

1) מ- A אל C.

2) מ- C אל D.

3) מ- E אל B.

ג. חשב את הכוח החשמלי המופעל על המטען שבסעיף הקודם, כאשר מניחים אותו בנקודה E.

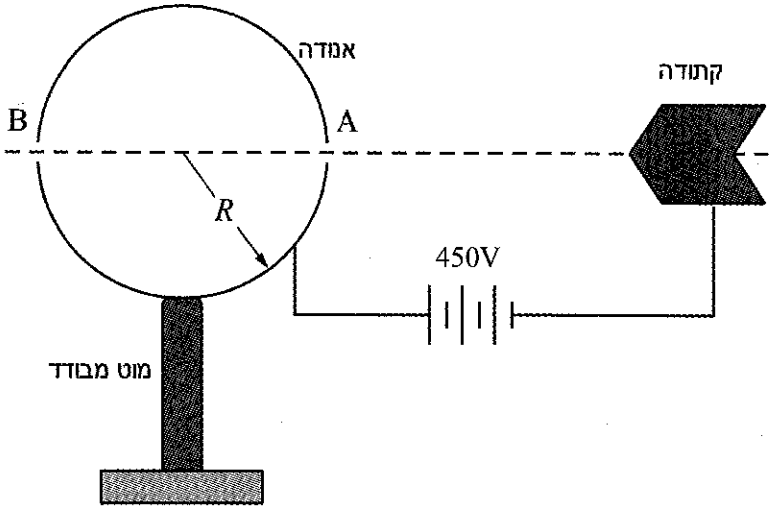
ד. בטא את הפוטנציאל הנוצר על ידי הכדור בנקודות הנמצאות מחוץ לכדור, כפונקציה של הפוטנציאל על פני הכדור V_0, רדיוס הכדור R_0 ומרחק הנקודה ממרכז הכדור r.

ה. מצא באיזה מרחק ממרכז הכדור הפוטנציאל יורד ל- $0.1V_0$.

בעיה 27/ פרק 1

בתרשים שלפניך מתוארת קתודה, המחוברת לקוטב השלילי של מקור מתח, ובמרחק מסוים ממנה נמצאת אנודה המחוברת לקוטב החיובי של מקור המתח. מקור המתח יוצר בין האנודה והקתודה הפרש פוטנציאלים שגודלו $450\,\text{V}$. האנודה מורכבת מקליפה כדורית מוליכה שרדיוסה $3\,\text{cm}$, המוצבת על מוט מבדד. מחממים את הקתודה, וכתוצאה מכך נפלטים ממנה אלקטרונים המואצים

לעבר האנודה. האלקטרונים נכנסים אל הקליפה הכדורית דרך פתח קטן A ויוצאים מצדה השני מפתח קטן אחר B (ראה תרשים).



א. האם בחיבור הנ"ל המתח על האנודה שווה ל- $450\,V$, קטן מ- $450\,V$ או גדול מ- $450\,V$? הסבר תשובתך.

ב. מאריקים את הקתודה. חשב את המטען על האנודה כעת.

ג. בהנחה שהמהירות ההתחלתית של האלקטרונים המשתחררים מהקתודה היא אפס, חשב את מהירות הגעתם אל הנקודה A.

ד. תאר את תנועת האלקטרונים בתוך הקליפה הכדורית, וחשב את מהירות יציאתם בנקודה B.

ה. מרחיקים כעת את הקתודה מהאנודה למרחק הגדול פי שניים מהמרחק ההתחלתי. קבע לגבי כל אחד מהגדלים הרשומים בסעיפים 1 עד 3 אם הוא משתנה או לא. הסבר תשובתך.

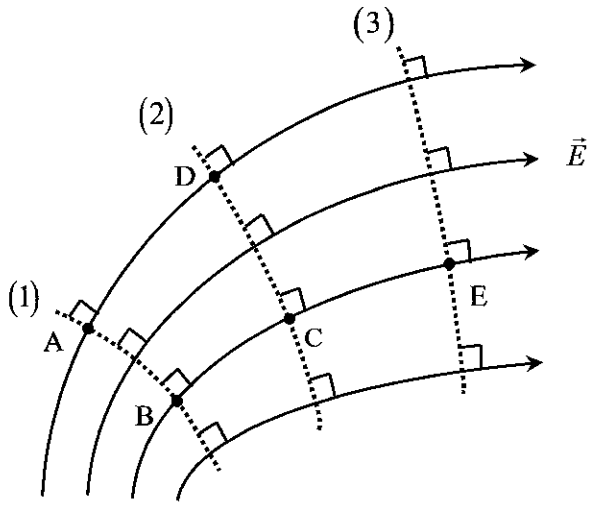
1) הפרש הפוטנציאלים בין האנודה לקתודה.

2) השדה החשמלי הממוצע בין הקתודה לאנודה.

3) מהירות הגעתם של האלקטרונים אל הנקודה A.

בעיה 28/ פרק 1

בתרשים המוצג לפניך מתוארים קווי שדה חשמלי (הקווים הרציפים) וחתכים של משטחים שווי פוטנציאל (הקווים המקווקווים).



א. קבע אם השדה החשמלי המתואר בתרשים הוא אחיד. הסבר קביעתך.

ב. הקווים 1, 2 ו-3 מתארים חתכים של משטחים שווי פוטנציאל. סדר את הפוטנציאל על משטחים אלה, V_1, V_2 ו-V_3, מהפוטנציאל הגבוה אל הפוטנציאל הנמוך.

ג. הראה כי קווי השדה החשמלי ניצבים למשטחים שווי הפוטנציאל.

ד. נתון $V_1 = 800\,\text{V}$ ו-$V_2 = 500\,\text{V}$. חשב את העבודה שיש לבצע כנגד הכוח החשמלי כדי להעביר מטען $q = -6\times10^{-3}\,\text{C}$ מ:

1) A אל B.

2) A אל C.

ה. חשב את הפוטנציאל V_3 אם נתון כי העבודה שיש לבצע כנגד הכוח החשמלי, כדי להעביר מטען שגודלו $6\,\text{nC}$ מ-E אל D היא $1.8\times10^{-6}\,\text{J}$.

בעיה 29/ פרק 1

א. נתונים שני כדורים מוליכים זהים, שרדיוס כל אחד מהם R. אחד הכדורים טעון במטען חיובי שגודלו $4\mu\text{C}$ והאחר ניטרלי. מקרבים את שני הכדורים זה לזה (ללא מגע ביניהם). כתוצאה מכך נוצרת משיכה חשמלית בין שני הכדורים על אף שאחד מהם הוא ניטרלי. הסבר כיצד נוצרת משיכה זו.

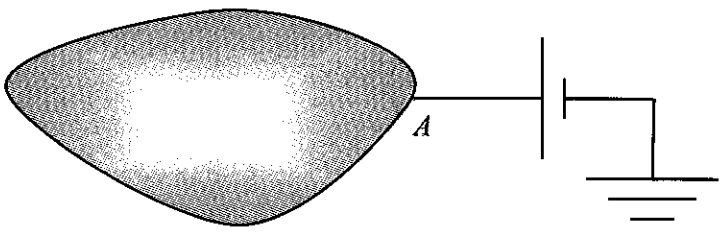
ב. מקרבים כעת את שני הכדורים זה לזה עד למגע ולאחר מכן מפרידים ביניהם. חשב את גודל המטען על כל אחד משני הכדורים לאחר המגע, ציין מאיזה כדור לאיזה כדור עברו האלקטרונים בפעולה זו, וחשב את מספרם.

ג. במצב המתואר בסעיף ב', מרחיקים את הכדור הטעון במטען שלילי, ומחברים את הכדור החיובי באמצעות תיל מוליך לכדור שלישי, מוליך וניטרלי, שרדיוסו $1.5R$. חשב את המטען על כל אחד משני הכדורים כתוצאה מהחיבור ביניהם, בהנחה שהמרחק בין מרכזי שני הכדורים גדול מאוד כך שהאינטראקציה החשמלית ביניהם זניחה.

ד. אם הכדור הניטרלי בסעיף א' היה מבדד, האם הייתה נוצרת משיכה בינו לבין הכדור הטעון, כאשר מקרבים את שני הכדורים זה לזה ללא מגע? הסבר תשובתך.

בעיה 30/ פרק 1

טוענים גוף מוליך לא סימטרי על ידי חיבורו לקוטב החיובי של מקור מתח. הקוטב השלילי של מקור המתח מחובר לאדמה (ראה תרשים). מקור המתח יוצר הפרש פוטנציאלים בין הגוף והאדמה שגודלו $1000\,\text{V}$.



כתוצאה מהחיבור למקור המתח, הכדור נטען במטען חיובי שגודלו $1\mu\text{C}$. לאחר הטעינה מנתקים את הגוף ממקור המתח.

א. תאר את התפלגות המטען על הגוף.

ב. קבע מהו הפוטנציאל על פני הגוף. הסבר תשובתך.

ג. קבע האם בתהליך טעינת הגוף עברו אליו אלקטרונים או יצאו ממנו אלקטרונים, וחשב את מספר האלקטרונים האלה.

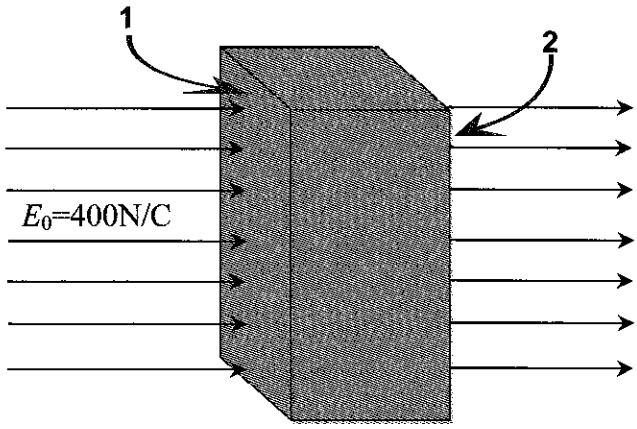
ד. מצא את השדה החשמלי בתוך הגוף.

ה. מצא את הפוטנציאל החשמלי בתוך הגוף.

ו. קבע מהו כיוונו של השדה החשמלי על פני הגוף. הסבר תשובתך.

בעיה 31/ פרק 1

מניחים תיבה מתכתית באיזור בו קיים שדה חשמלי אחיד שעוצמתו $E_0 = 400\,\mathrm{N/C}$. השדה החשמלי ניצב לדפנות 1 ו-2 של התיבה, ומקביל לשאר הדפנות (ראה תרשים).



א. תאר מהי ההשפעה של השדה החשמלי על התיבה המתכתית.

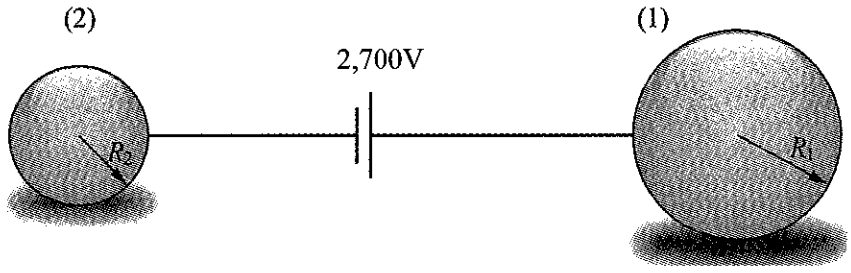
ב. קבע את גודל השדה החשמלי בתוך התיבה.

ג. חשב את הצפיפות המשטחית הממוצעת של המטענים על הדפנות 1 ו-2 (ראה תרשים).

ד. חשב את גודל השדה החשמלי בתוך התיבה אם היא עשויה מחומר מבדד שהמקדם הדיאלקטרי שלו $\varepsilon_r = 4$.

בעיה 32/ פרק 1

מחברים שני כדורים לא טעונים 1 ו-2 לשני קטביו של מקור מתח. כדור 1 מחובר לקוטב החיובי של מקור המתח, וכדור 2 מחובר לקוטב השלילי שלו (ראה תרשים). מקור המתח יוצר הפרש פוטנציאלים בין שני הכדורים שגודלו $2{,}700\,\mathrm{V}$. נתון שרדיוס הכדור הראשון הוא $R_1 = 4\,\mathrm{cm}$, ורדיוס הכדור השני הוא $R_2 = 2\,\mathrm{cm}$, ונתון גם כי המרחק בין מרכזי שני הכדורים גדול מאוד כך שהאינטראקציה החשמלית בין שני הכדורים זניחה.



א. קבע מהו הקשר בין המטענים המצטברים על שני הכדורים עקב החיבור למקור המתח. הסבר.

ב. חשב את גודלו של המטען על כל אחד משני הכדורים.

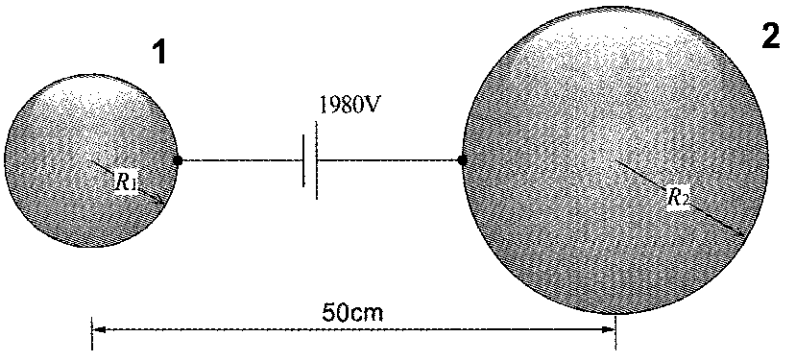
ג. חשב את העבודה שמקור המתח מבצע בטעינת שני הכדורים.

ד. חשב את גודל המטען על כל אחד משני הכדורים אם מאריקים את הכדור 1.

ה. התייחס לסעיף ד וחשב את מספר האלקטרונים שעברו דרך מקור המתח, וקבע את כיוון תנועתם.

בעיה 33/ פרק 1

מחברים שני כדורים מוליכים וניטרליים 1 ו-2 לשני הקטבים של מקור מתח באמצעות חוטים מוליכים. כדור 1 מחובר לקוטב השלילי של מקור המתח, וכדור 2 מחובר לקוטב החיובי שלו (ראה תרשים). מקור המתח יוצר הפרש פוטנציאלים שגודלו $1980\,\text{V}$ בין שני הכדורים. כתוצאה מהחיבור למקור המתח, כדור 1 נטען במטען q_1 וכדור 2 נטען במטען q_2.



נתון כי רדיוסו של כדור 1 הוא $R_1 = 10\,\text{cm}$, רדיוסו של כדור 2 הוא $R_2 = 20\,\text{cm}$, והמרחק בין מרכזי שני הכדורים הוא $x = 50\,\text{cm}$ (ראה תרשים). נתון גם כי למרות ההשפעה החשמלית ההדדית בין שני הכדורים ניתן להתייחס להתפלגות המטען על כל אחד מהם כאחידה.

א. קבע מהו הקשר בין המטענים q_1 ו-q_2, וקבע את סימניהם.

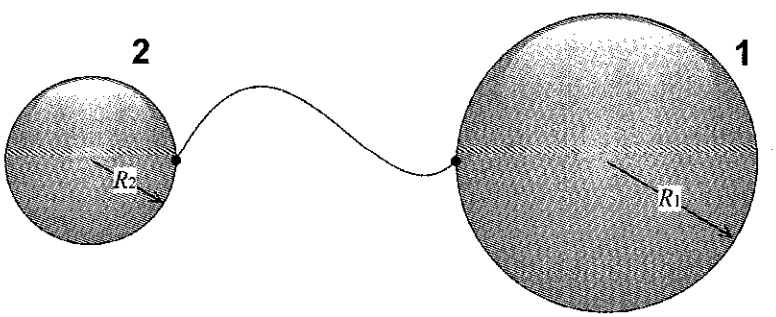
ב. חשב את q_1 ואת-q_2.

ג. קבע מאיזה כדור לאיזה כדור עברו אלקטרונים בתהליך הטעינה, וחשב את מספרם.

ד. חשב את עבודת מקור המתח בתהליך טעינת שני הכדורים.

בעיה 34/ פרק 1

טוענים כדור מוליך (1) עד לפוטנציאל של $900\,\text{V}$. לאחר מכן מחברים אותו באמצעות חוט מוליך ארוך לכדור מוליך אחר (2) כפי שמתואר בתרשים שלהלן.



כתוצאה מהחיבור בין שני הכדורים, הפוטנציאל על הכדור הראשון יורד ל- $225\,\text{V}$.

נתון שרדיוס הכדור הראשון הוא $R_1 = 20\,\text{cm}$, רדיוס הכדור השני הוא $R_2 = 5\,\text{cm}$, והמרחק בין מרכזי שני הכדורים גדול מאוד כך שהאינטראקציה החשמלית בין שני הכדורים זניחה.

א. חשב את כמות המטען שהייתה על הכדור 1 לפני חיבורם של שני הכדורים.

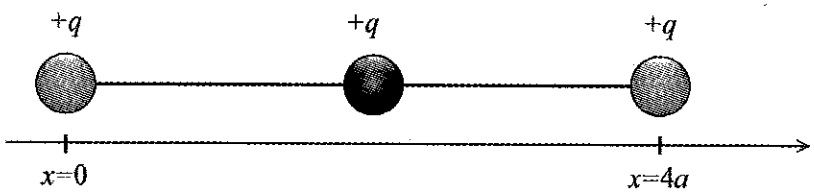
ב. חשב את כמות המטען שעברה מהכדור 1 אל הכדור 2.

ג. קבע מאיזה כדור לאיזה כדור עברו האלקטרונים בחיבור הנ"ל, וחשב את מספרם.

ד. קבע אם הכדור 2 היה טעון לפני החיבור בין שני הכדורים. אם היה טעון, חשב את כמות המטען שהייתה עליו לפני החיבור.

בעיה 35/ פרק 1

בתרשים הבא מתואר מוט דק אופקי שאורכו $\ell = 4a$ העשוי מחומר מבדד, המונח לאורך ציר x. בשני קצוות המוט קבועים שני חרוזים קטנים וטעונים. החרוז הראשון טעון במטען שגודלו $+q$ (q גודל חיובי) ונמצא בנקודה $x = 0$ והשני טעון במטען זהה שגודלו $+q$ ונמצא בנקודה $x = \ell = 4a$. חרוז שלישי מושחל על המוט, מסתו m ומטענו $+q$ גם כן. חרוז זה יכול לנוע לאורך המוט ללא חיכוך.



א. חשב את מיקומה של נקודה B על המוט, שבה החרוז החופשי נמצא במצב שווי משקל. בטא את תשובתך באמצעות ℓ.

מזיזים את החרוז לנקודה A הנמצאת במרחק a ימינה לנקודה B, ומשחררים אותו ממנוחה.

ב. תאר את תנועת החרוז, וקבע באיזו נקודה לאורך המוט מהירותו היא מקסימלית.

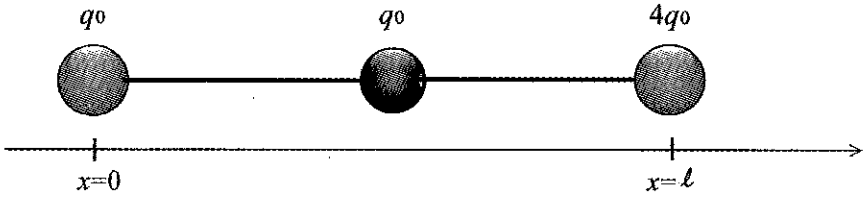
ג. חשב את המהירות המקסימלית של החרוז. בטא את תשובתך באמצעות נתוני השאלה.

ד. חשב את מיקומה של הנקודה C, שבה החרוז נעצר רגעית במהלך תנועתו. בטא את תשובתך באמצעות a.

בעיה 36/ פרק 1

בתרשים שלפניך מתואר מוט דק אופקי שאורכו ℓ שעשוי מחומר מבדד ומונח לאורך ציר x. בשני קצוות המוט קבועים שני חרוזים קטנים. הראשון נמצא בנקודה $x = 0$ והוא טעון במטען שגודלו q_0, והשני נמצא בנקודה $x = \ell$ והוא טעון במטען שגודלו $4q_0$. חרוז שלישי מושחל על המוט והוא חופשי לנוע לאורך המוט ללא חיכוך (ראה תרשים).

נתון שהחרוז החופשי טעון במטען q_0 ומסתו m.



א. חשב את מיקומה של נקודה B על המוט, שבה החרוז החופשי נמצא במצב שווי משקל. בטא את תשובתך באמצעות הגודל ℓ. שים לב, הנקודה B איננה מסומנת בתרשים.

ב. חשב את הפוטנציאל החשמלי בנקודה B שמצאת בסעיף הקודם, והנוצר על ידי שני המטענים הנמצאים בקצוות המוט. בטא את תשובתך באמצעות נתוני השאלה.

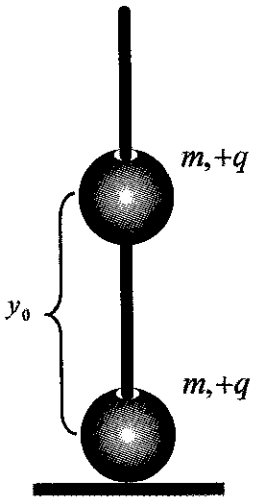
מזיזים את החרוז החופשי ימינה לנקודה אחרת (A), שהיא נקודת האמצע של המוט, ומשחררים אותו ממנוחה (שים לב! הנקודה A איננה מסומנת בתרשים).

ג. תאר את תנועת החרוז, וקבע באיזו נקודה לאורך המוט מהירותו היא מקסימלית.

ד. חשב את מהירותו המקסימלית של החרוז. בטא את תשובתך באמצעות נתוני השאלה.

ה. חשב את מיקומה של נקודה C מצד שמאל לנקודת שווי משקל, שבה החרוז נעצר רגעית במהלך תנועתו. בטא את תשובתך באמצעות ℓ.

בעיה 37/ פרק 1



בתרשים שלפניך מתואר מוט דק העשוי מחומר מבדד המהודק למשטח אופקי, וניצב לו. משחילים על המוט שני חרוזים זהים. לשני החרוזים רדיוס ומסה זהים, R ו-m בהתאמה, ושניהם טעונים במטען חיובי זהה, q כל אחד. החרוז התחתון נשען על המשטח, והחרוז האחר נעצר מעליו במצב של שווי משקל. במצב זה המרחק בין מרכזי שני החרוזים הוא y_0 (ראה תרשים).

חשב את y_0. בטא את תשובתך באמצעות נתוני השאלה.

א. חשב את הכוח הנורמלי N, שהמשטח האופקי מפעיל על החרוז התחתון. בטא את תשובתך באמצעות m.

מזיזים את החרוז העליון כלפי מעלה, עד לנקודה שבה המרחק בין מרכזי שני החרוזים שווה ל-$2y_0$, ומשחררים אותו ממנוחה.

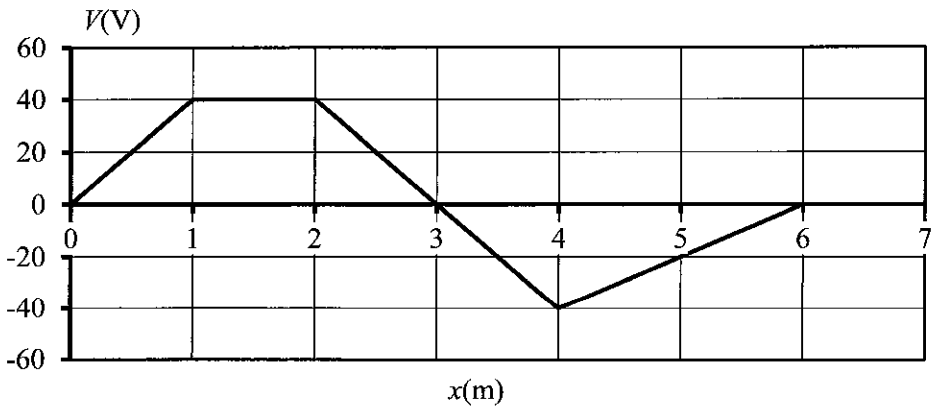
ב. מצא את המרחק המינימלי אליו מגיע חרוז זה ממרכז החרוז התחתון. בטא את תשובתך באמצעות הגודל y_0.

ג. קבע באיזו נקודה לאורך מסלולו מהירות החרוז מקסימלית.

ד. מצא את המהירות המקסימלית של החרוז בנקודה שציינת בסעיף הקודם. בטא את תשובתך באמצעות הגדלים y_0 ו-g.

בעיה 38/ פרק 1

הגרף שלפניך מתאר את השתנות הפוטנציאל לאורך ציר x כפונקציה של המיקום x.



א. הגדר את הפוטנציאל החשמלי בנקודה מסוימת, וציין באילו יחידות מקובל למדוד גודל זה.

ב. שרטט גרף אשר מתאר את גודל השדה החשמלי לאורך ציר x כפונקציה של המיקום x.

ג. משחררים אלקטרון בנקודה $x = 3\,\text{m}$:

1) קבע לאיזה כיוון ינוע האלקטרון. הסבר קביעתך.

2) באיזה מיקום (או תחום) על ציר x תהיה מהירות האלקטרון מקסימלית?

3) חשב את המהירות המקסימלית בתת הסעיף הקודם.

ד. חשב את המהירות המינימלית שיש להקנות לאלקטרון הנמצא בנקודה $x = 6\,\text{m}$, כדי שיוכל להגיע לנקודה $x = 2\,\text{m}$.

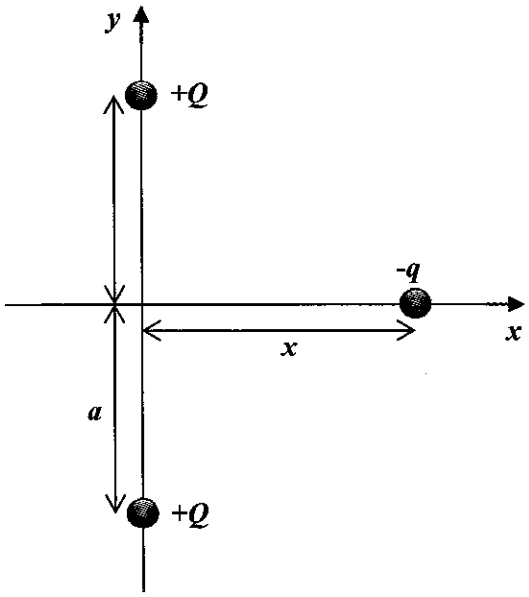
ה. התייחס לסעיף הקודם וחשב את מהירות הגעת האלקטרון לנקודה $x = 2\,\text{m}$.

ו. משחררים אלקטרון בנקודה $x = 0$. חשב את השינוי באנרגיה הפוטנציאלית החשמלית שלו כאשר הוא מגיע לנקודה $x = 2\,\text{m}$. בטא את תשובתך ביחידות eV ו-J.

בעיה 39/ פרק 1

במערכת הצירים xy שלפניך מתוארים שני מטענים חיוביים זהים, מטען כל אחד מהם $+Q$, הקבועים בנקודות $(0,a)$ ו-$(0,-a)$.

בנקודה $(0,x)$ משחררים ממנוחה חלקיק טעון. מסת החלקיק היא m ומטענו $-q$, כאשר q הוא גודל חיובי. נתון שכוח הכובד שפועל על החלקיק זניח ביחס לכוחות החשמליים הפועלים עליו.



א. ציין בעזרת חצים את הכוחות החשמליים המופעלים על החלקיק הטעון ברגע שחרורו.

ב. מצא את הכוח השקול המופעל על החלקיק כפונקציה של x. בטא את תשובתך באמצעות נתוני השאלה.

ג. חשב את הכוח השקול שמצאת בסעיף הקודם, כאשר $x=0$, וכאשר $x \to \pm\infty$.

ד. (*בחירה) ציין באיזה תחום הכוח השקול שחישבת בסעיף ב' הוא חיובי ובאיזה תחום כוח זה הוא שלילי, ושרטט גרף המתאר באופן איכותי את הכוח השקול כפונקציה של x.

ה. משחררים כעת את החלקיק הנקודתי הטעון ממנוחה מהנקודה $(0.75a,0)$.

1) חשב את מהירותו של חלקיק זה כאשר הוא עובר בנקודה $x=0$. בטא את תשובתך באמצעות נתוני השאלה.

2) הראה שהמהירות שחישבת בתת הסעיף הקודם היא המהירות המקסימלית של החלקיק בתנועתו על ציר x.

3) קבע את מיקום הנקודה שבה נעצר החלקיק רגעית בחלק השלילי של ציר x.

4) תאר במילים את תנועת החלקיק.

בעיה 40/ פרק 1

באחד הניסויים לחקירת התנגשויות בין חלקיקים, מפציצים יוני היליום ${}^{4}_{2}He^{+2}$ בפרוטונים. (יון ההליום מורכב משני פרוטונים ושני ניוטרונים). נתון שאחד הפרוטונים מתקרב ממרחק גדול מאוד ליון הליום הנמצא במנוחה ומתנגש בו התנגשות חזיתית.

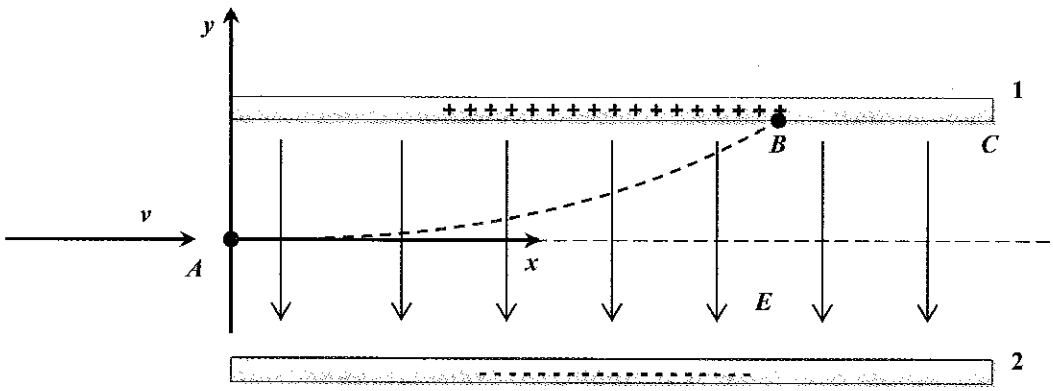
חשב את המרחק המינימלי בין הפרוטון ליון ההיליום במהלך ההתנגשות זו אם נתון שמהירות הפרוטון כשהיה במרחק גדול מאוד מיון ההליום היא $6\times10^{4}\,m/s$, שיון ההליום חופשי לנוע במהלך ההתנגשות, ושכוחות ההכובד זניחים בבעיה זו.

תנועה משופעת של מטענים בשדה חשמלי אחיד

בעיה 41/ פרק 1

נתונים שני לוחות אופקיים ומקבילים זה לזה. הלוח העליון (לוח 1) טעון במטען חיובי והתחתון (לוח 2) טעון במטען שלילי. כתוצאה מהמטענים שעל הלוחות, שורר ביניהם שדה חשמלי אחיד שעוצמתו $10^2\ \mathrm{N/C}$ ומכוון מהלוח החיובי אל הלוח השלילי (ראה תרשים).

אלומת אלקטרונים שנעה בכיוון אופקי נכנסת בנקודה A אל החלל שבין שני הלוחות, ובכיוון המקביל ללוחות.



נתון: מהירות כניסת האלקטרונים אל השדה החשמלי בנקודה A היא $v_0 = 10^6\ \mathrm{m/s}$, המרחק בין הלוחות הוא $0.4\,\mathrm{cm}$ והנקודה A נמצאת באמצע המרחק בין שני הלוחות. כוח הכובד הפועל על האלקטרונים זניח ביחס לכוח החשמלי הפועל עליהם.

עבוד במערכת הצירים המתוארת בתרשים, וענה על השאלות הבאות:

א. חשב את גודל וכיוון תאוצת האלקטרונים בתנועתם בין הלוחות.

ב. הראה כי מסלול תנועתם של האלקטרונים בשדה החשמלי הוא פרבולה.

ג. חשב את שיעורי נקודת פגיעת האלקטרונים בלוח 1.

ד. חשב את מהירות הפגיעה (גודל וכיוון) של האלקטרונים בלוח 1.

ה. מה צריכה היות המהירות המינימלית של האלקטרונים, ברגע כניסתם אל השדה החשמלי, על מנת שיצאו מהחלל בין הלוחות ולא יפגעו בלוח 1. נתון שאורך כל אחד משני הלוחות הוא $8\,\mathrm{cm}$.

ו. מצא את כיוון יציאת האלקטרונים מבין הלוחות במקרה המתואר בסעיף הקודם.

בעיה 42/ פרק 1

נתונים שני לוחות אופקיים ומקבילים הנמצאים במרחק $6\,\mathrm{mm}$ זה מזה. שני הלוחות מחוברים למקור מתח, וכתוצאה מכך שורר ביניהם שדה חשמלי אחיד המכוון מאחד הלוחות אל הלוח האחר. אלומת אלקטרונים, שכיוונה אופקי, נכנסת אל החלל שבין הלוחות מנקודה שתסומן ב- A במהירות $v_0 = 8\times10^6\ \mathrm{m/s}$ (ראה תרשים).

כתוצאה מהכוח החשמלי הפועל על האלקטרונים במהלך תנועתם בין הלוחות, הם סוטים ממסלולם הישר, ויוצאים מהחלל שבין הלוחות בנקודה B הנמצאת במרחק $2\,\mathrm{mm}$ מעל לקו תנועת האלקטרונים לפני כניסתם לשדה החשמלי (ראה תרשים).

נתון שאורך כל אחד משני הלוחות הוא $10\,\mathrm{cm}$.

היעזר במערכת הצירים המופיעה בתרשים וענה על השאלות הבאות:

א. חשב את הזמן שלוקח לאלקטרונים לעבור את הדרך מ- A עד B.

ב. חשב את עוצמת השדה החשמלי השורר בין שני הלוחות וקבע את כיוונו.

ג. חשב את המתח בין שני הלוחות, וקבע מי מבין הלוחות נמצא בפוטנציאל גבוה יותר.

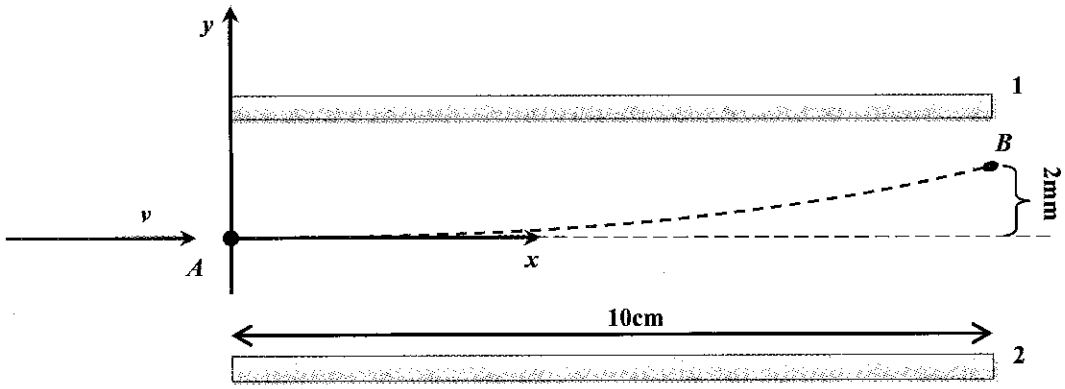
ד. חשב את מהירות האלקטרונים בנקודה B.

ה. מגדילים את המהירות ההתחלתית של האלקטרונים פי שניים. לגבי כל אחד מהגדלים הבאים קבע אם הוא משתנה או לא. אם הוא משתנה, קבע פי כמה. הסבר את תשובותיך.

1) זמן התנועה מ- A עד B.

2) רכיב המהירות של האלקטרונים בכיוון ציר y בנקודה B.

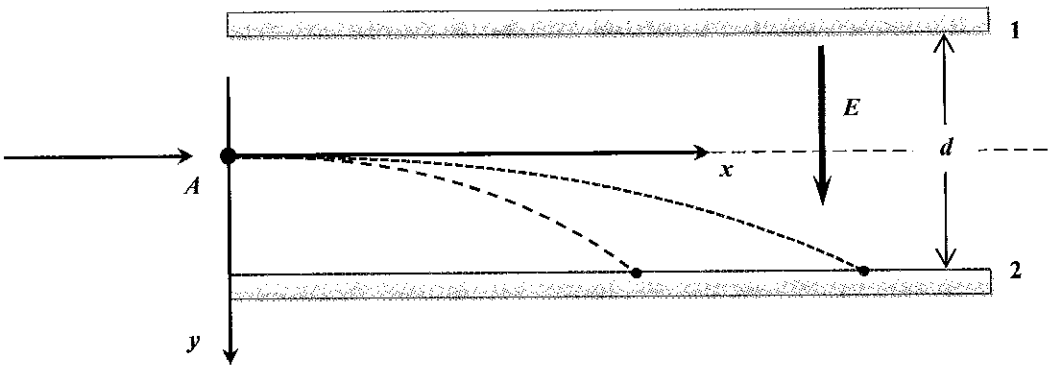
3) מרחק הנקודה B מקו תנועת האלקטרונים לפני כניסתם לשדה החשמלי (הגודל y_B).



בעיה 43/ פרק 1

מכוונים שתי אלומות שונות, אחת מורכבת מפרוטונים והשנייה מחלקיקי α, זו אחר זו אל החלל שבין שני לוחות אופקיים ומקבילים. בין הלוחות שורר שדה חשמלי אחיד שגודלו E והמכוון מהלוח העליון (לוח 1) אל הלוח התחתון (לוח 2).

אלומות החלקיקים נכנסות לשדה החשמלי בכיוון אופקי דרך נקודת האמצע שבין שני הלוחות (הנקודה A בתרשים). כתוצאה מהשפעת השדה החשמלי, הן סוטות ממסלולן הישר, ופוגעות בלוח 2 (ראה תרשים).



נתון שהמרחק בין שני הלחות הוא d. כוח הכבידה בבעיה זו זניח ביחס לכוח החשמלי הפועל על החלקיקים.

בחר במערכת הצירים המתוארת בתרשים וענה על השאלות הבאות:

א. חשב את היחס בין תאוצת הפרוטונים ותאוצת חלקיקי ה- α בתנועתם בשדה החשמלי.

ב. נסמן ב- t_p את הזמן שלוקח לפרוטון לעבור את הדרך מ- A עד לנקודת ההתנגשות בלוח 2, וב- t_α את הזמן שלוקח לחלקיק α לעבור את הדרך מ- A עד לנקודת ההתנגשות בלוח 2. קבע מי מבין שני זמנים אלה ארוך יותר. חשב את היחס בין שני הזמנים.

ג. חשב את היחס בין העתקי האלומות בכיוון ציר x מהנקודה A עד לנקודות הפגיעה בלוח 2 במקרים הבאים:

1) כאשר לחלקיקים בשתי האלומות יש אותה מהירות לפני כניסתם אל השדה החשמלי.

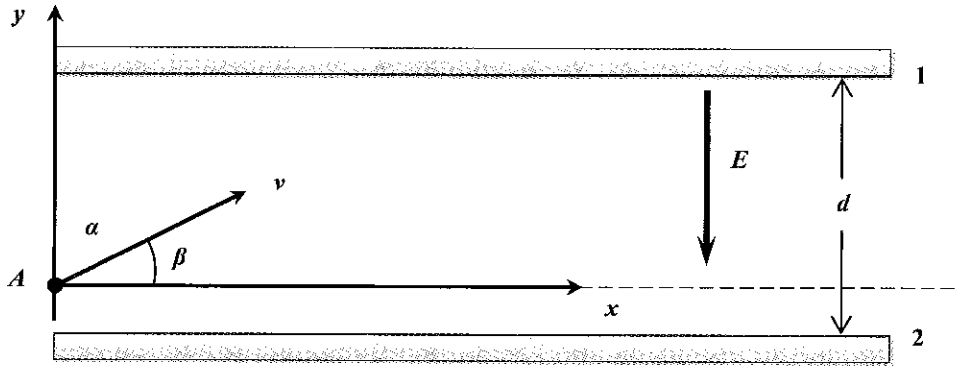
2) כאשר לחלקיקים בשתי האלומות יש אותה אנרגיה קינטית לפני כניסתם אל השדה החשמלי.

ד. חשב את היחס בין רכיבי ה- y של מהירויות הפגיעה בלוח 2, עבור שני סוגי החלקיקים שבשתי האלומות.

ה. קבע מה צריך להיות היחס בין מהירות הפרוטונים ומהירות חלקיקי האלפא על מנת שיפגעו באותה נקודה בלוח 2? הסבר את תשובתך.

בעיה 44/ פרק 1

חלקיק α נכנס אל החלל שבין שני לוחות אופקיים, מקבילים וטעונים הנמצאים במרחק $d = 6\,\text{cm}$ זה מזה. כתוצאה מהמטען החשמלי שעל הלוחות שורר ביניהם שדה חשמלי אחיד שעוצמתו $10^4\ \text{N/C}$ המכוון מהלוח העליון (לוח 1) אל הלוח התחתון (לוח 2) כפי שמתואר בתרשים שלפניך.



נתון שחלקיק α נכנס אל החלל שבין הלוחות דרך נקודה A הנמצאת במרחק $1\,\text{cm}$ מהלוח התחתון (ראה תרשים). מהירות חלקיק ה- α בנקודה זו היא $v_0 = 6\times10^5\ \text{m/s}$, והיא יוצרת זווית β מעל הקו האופקי (ראה תרשים)

היעזר במערכת הצירים המתוארת בתרשים וענה על השאלות הבאות:

א. חשב את הערך המקסימלי עבור הזווית β שעבורו חלקיק ה- α אינו מתנגש בלוח העליון.

נסמן באות B את נקודת הפגיעה של חלקיק ה- α בלוח התחתון במקרה שבו הזווית β שווה לזווית שחישבת בסעיף הקודם.

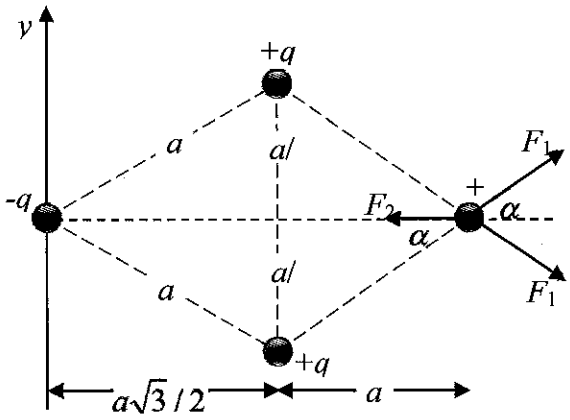
ב. חשב את שיעורי הנקודה B.

ג. חשב את מהירות פגיעת חלקיק ה- α בנקודה B.

פתרון בעיות פרק 1- בעיות באלקטרוסטטיקה

פתרון בעיה 1/ פרק 1

א. בתרשים הבא מוצגים הכוחות החשמליים הפועלים על המטען $+Q$:



ב. (1)

$$F_1=\frac{kQq}{\left(a^2+0.25a^2\right)}=\frac{kQq}{1.25a^2}$$

$$F_2=\frac{k|-q|Q}{\left(a+a\sqrt{3}/2\right)^2}=\frac{kqQ}{a^2\left(1+\sqrt{3}/2\right)^2}$$

(2)

$$\Sigma F_y=0$$

$$\Sigma F_x=2F_1\cos\alpha-F_2=$$

$$=2\frac{kQq}{1.25a^2}\left(\frac{a}{\sqrt{a^2+(a/2)^2}}\right)-\frac{kqQ}{a^2\left(1+\sqrt{3}/2\right)^2}=$$

$$=\frac{kQq}{a^2}\left[\frac{2}{1.25}\frac{1}{\sqrt{1.25}}-\frac{1}{\left(1+\sqrt{3}/2\right)^2}\right]=1.144\frac{kQq}{a^2}$$

הכוח השקול חיובי, לכן הכיוון שלו הוא בכיוון החיובי של ציר ה-x.

פתרון בעיה 2/ פרק 1

א. על שני הכדורים פועלים כוחות דחייה. גודלו של הכוח החשמלי המופעל על כל אחד משני הכדורים הוא:

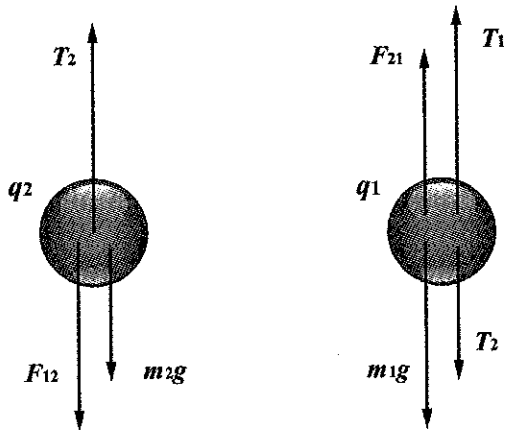
$$|F_{12}|=|F_{21}|=\frac{k|q_1||q_2|}{d^2}=$$

$$=\frac{9\times10^9\left(4\times10^{-7}\right)^2}{0.1^2}=0.144\,\text{N}$$

ב. לא, כי הכוחות החשמליים הפועלים על כל אחד משני הכדורים, שהם כוחות פעולה ותגובה, נחשבים לכוחות פנימיים ביחס למערכת שני הכדורים המחוברים בחוט 2. כוחות אלה מבטלים זה את זה ביחס לחוט 1. לכן המתיחות בחוט 1 שווה לכוח הכובד הפועל על שני הכדורים: $T_1=\left(m_1+m_2\right)g$ (ראה סעיף ד').

ג. כן, כי כוחות הדחייה בין שני המטענים פועלים על קצוות החוט 2 כלפי חוץ, ולכן כוחות אלה גורמים להגדלת המתיחות בחוט 2.

ד. הכוחות הפועלים על כל אחד משני הכדורים, מתוארים בתרשים הבא:



עבור הכדור השני נקבל:

$$(1)\quad T_2=m_2g+F_{12}=$$

$$=\tfrac{20}{1000}(10)+0.144=0.344\,\text{N}$$

עבור הכדור הראשון נקבל:

$$(2)\quad T_1+F_{21}=T_2+m_1g$$

נציב את T_2 ממשוואה (1) במשוואה (2) ונקבל:

$$T_1+F_{21}=\left(m_2g+F_{12}\right)+m_1g$$

$$\Rightarrow T_1=m_2g+m_1g=0.4\,\text{N}$$

ה. כדי שהמתיחות בחוט 2 תתאפס צריך להתקיים שהכוח החשמלי המופעל על כדור 2 שווה בגודלו ומנוגד בכיווני לכוח הכובד המופעל על כדור זה, כלומר:

$$\frac{9\times10^9\left(4\times10^{-7}\right)|q_2|}{0.1^2}=m_2g=0.2$$

$$\Rightarrow|q_2|=5.56\times10^{-7}\,C$$

מאחר שכיוון כוח זה הוא כלפי מעלה, ניתן להסיק שהמטען q_2 חייב להיות שלילי, לכן:

$$q_2 = -5.56\times10^{-7}\ \text{C}$$

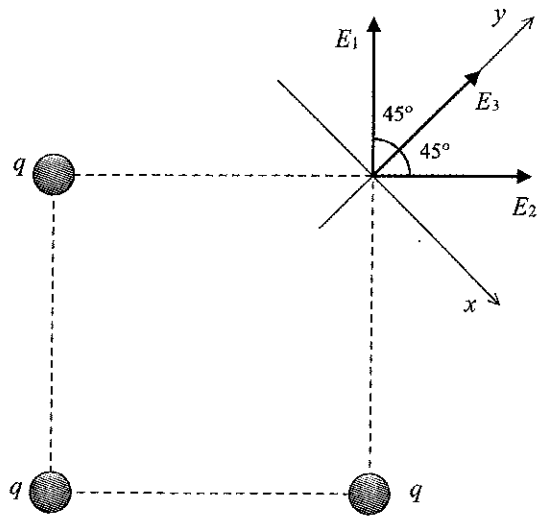
פתרון בעיה 3/ פרק 1

א. השדה החשמלי בנקודה מסוימת הוא גודל פיזיקלי המתאר את הכוח החשמלי המופעל על יחידת מטען הנמצאת בנקודה זו. יחידת גודל זה היא N/ C.

כיוון השדה החשמלי בנקודה מסוימת נקבע ככיוון הכוח החשמלי המופעל על מטען בוחן חיובי הנמצא בנקודה זו.

על פי הגדרה זו, השדה החשמלי בנקודה מסוימת נתון על ידי הביטוי: $\vec{E} = \frac{\vec{F}_{q'}}{q'}$, כאשר q' הוא מטען בוחן חיובי המונח בנקודה זו, ו- $\vec{F}_{q'}$ הוא הכוח החשמלי שפועל על מטען הבוחן בנקודה זו.

ב. נשתמש בתרשים הבא:



כאשר:

$$E_1 = E_2 = \frac{9\times10^9\left(40\times10^{-9}\right)}{0.1^2} = 36{,}000\frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$E_3 = \frac{9\times10^9\left(40\times10^{-9}\right)}{\left(0.1\sqrt{2}\right)^2} = 18{,}000\ \text{N/ C}$$

במערכת הצירים המתוארת בתרשים מתקיים:

$$\Sigma E_x = 0$$

$$\Sigma E_y = E_3 + 2E_1\cos 45 = 68{,}911.7\frac{\text{N}}{\text{C}}$$

כלומר כיוון השדה החשמלי בקודקוד הרביעי הוא בכיוון ציר y שבתרשים.

ג. הכוח השקול נתון על ידי: $\Sigma\vec{F} = q'\Sigma\vec{E}$, לכן נקבל:

$$\Sigma F = q'E = \left(-40\times10^{-9}\right)\left(68{,}911.7\right) =$$

$$= -2.76\times10^{-3}\ \text{N}$$

כאשר כיוון כוח זה הוא נגד כיוון השדה החשמלי השקול בנקודה זו, כלומר בכיוון השלילי של ציר ה- y שבתרשים.

ד. השדה של המטען q'' חייב לבטל את השדה השקול של שאר המטענים, כלומר הוא צריך להיות מכוון בכיוון השלילי של ציר ה- y. לכן המטען q'' צריך להיות שלילי כך שיתקיים:

$$\frac{9\times10^9\left|q''\right|}{\left(0.1\sqrt{2}/2\right)^2} = 68{,}911.7$$

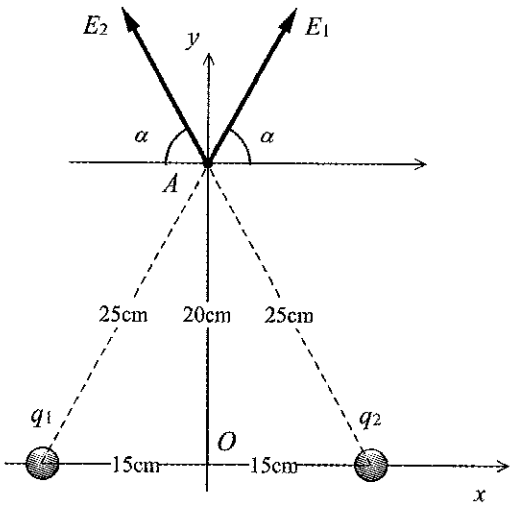
$$\Rightarrow q'' = -3.83\times10^{-8}\ \text{C}$$

פתרון בעיה 4/ פרק 1

א. כן. שני השדות החשמליים הנוצרים על ידי שני המטענים בראשית הצירים (בנקודה O), שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם, לכן השדה החשמלי השקול בנקודה זו מתאפס.

ב. לא, כי הפוטנציאל החשמלי הנוצר מכל אחד משני המטענים בכל הנקודות על ציר ה- x הוא גודל חיובי, לכן בכל הנקודות הפוטנציאל החשמלי הנוצר על ידי שני המטענים הוא גודל חיובי (רק באינסוף, כמובן, הפוטנציאל מתאפס).

ג. נעזר בתרשים הבא:



כאשר מתקיים:

$$E_1 = E_2 = \frac{kq}{r^2} = \frac{9\times10^9\left(2\times10^{-9}\right)}{\left(\sqrt{0.15^2+0.2^2}\right)^2} = 288\,\mathrm{N/C}$$

במערכת הצירים xy המתוארת בתרשים מתקיים:

$$\Sigma E_x = 0$$

$$\Sigma E_y = 2E_1\sin\alpha = 2(288)\left(\frac{20}{25}\right) =$$

$$= 460.8\,\mathrm{N/C}$$

ד. הכוח השקול המופעל על האלקטרון בנקודה A מכוון לעבר הראשית O. כדי שהאלקטרון יבצע תנועה מעגלית בהשפעת כוח זה, יש להקנות לו בנקודה A מהירות v הניצבת למישור xy, ואשר מקיימת את התנאי הבא, המתקבל משימוש בחוק השני של ניוטון בתנועה המעגלית:

$$\Sigma F_e = |q_e|\Sigma E_A = m_e\frac{v^2}{R}$$

כאשר R הוא רדיוס המסלול המעגלי ששווה במקרה זה ל- $0.2\,\mathrm{m}$.

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{eR\Sigma E}{m_e}} =$$

$$= \sqrt{\frac{\left(1.6\times10^{-19}\right)(0.2)(460.8)}{9.11\times10^{-31}}} = 4.02\times10^6\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

פתרון בעיה 5/ פרק 1

א.

(1) מאחר שיש דחייה חשמלית בין שני הכדורים, ניתן להסיק ששני הכדורים טעונים במטענים שיש להם סימן זהה. מכיוון שהכדור a טעון במטען חיובי, הכדור b חיובי גם כן.

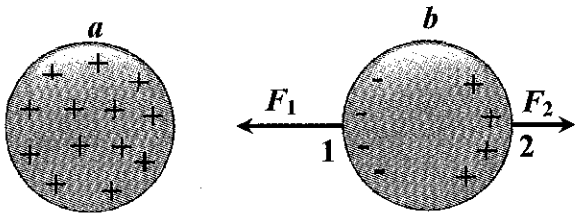
(2) לא בהכרח, וזה בגלל שכוחות הדחייה החשמליים הפועלים בין שני הכדורים הם כוחות פעולה ותגובה, השווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם אפילו אם המטענים שעל שני הכדורים אינם שווים בגודלם. לכן, אם המסות של שני הכדורים זהות, גם הזוויות תהיינה תמיד שוות.

ב.

(1) מאחר שפועלים כעת כוחות משיכה בין שני הכדורים הטעונים, ניתן להסיק ששני הכדורים טעונים במטענים שסימניהם מנוגדים. מכיוון שהכדור a טעון במטען חיובי, הכדור b יהיה שלילי.

(2) לא. התשובה זהה לזו שבתת סעיף א'2.

(3) התלמיד צודק, שהרי אם כדור b ניטרלי ומוליך, יכול להיווצר בו קיטוב בגלל המטען החיובי שעל כדור a, כפי שמתואר בתרשים הבא:



המטען השלילי שמצטבר בצד 1 של הכדור b, שווה בגודלו אך מנוגד בסימנו למטען החיובי שמצטבר בצדו השני (בצד 2 של הכדור b). מאחר שצד 1 קרוב יותר למטען החיובי הנמצא על כדור a, נקבל כי $F_1 > F_2$, ולכן הכוח השקול על הכדור b יהיה לכיוון כדור a, ובכך נוצרת משיכה בין שני הכדורים על אף שכדור b הוא ניטרלי.

גם אם הכדור b אינו מוליך אלא מבדד, נוצרת משיכה בינו לבין הכדור a. כי כעת נוצר קיטוב בכדור b ברמת מולקולות החומר. כתוצאה מקיטוב זה נוצר כוח שקול על כל מולקולה לכיוון הכדור a (לפי אותו עיקרון שהוסבר מעלה), והתוצאה היא שנוצר במקרה זה כוח שקול על הכדור b שיגרום לו להימשך לכדור a (גם הכדור a נמשך לכדור b על פי החוק השלישי של ניוטון).

שים לב, דבר זה אינו נכון בנוגע לסעיף א', כי הכוחות בין גוף טעון לניטרלי הנוצרים כתוצאה מקיטוב אינם גורמים לדחייה חשמלית אלא רק למשיכה, כי גודל כוח המשיכה הפועל על צדו של הגוף הניטרלי הקרוב אל הגוף הטעון (הצד 1 בתרשים הנ"ל) הוא תמיד גדול מכוח הדחייה הפועל על הצד המרוחק של הגוף הניטרלי (הצד 2 בתרשים הנ"ל).

ג. הכוחות החשמליים הפועלים בין שני הכדורים שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם. לעומת זאת, כוח הכובד הפועל על כל אחד משני הכדורים שונה (בגלל שהמסות של שני הכדורים שונות), לכן הזוויות תהיינה שונות. הזווית ההטיה של הכדור הכבד יותר תהיה קטנה יותר.

פתרון בעיה 6/ פרק 1

א. האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית הכוללת של מערכת המטענים הנתונה, היא סכום כל האנרגיות הפוטנציאליות החשמליות של כל זוגות המטענים בבעיה:

$$U=3\frac{kq^2}{a}=$$

$$=3\frac{\left(9\times10^9\right)\left(4\times10^{-6}\right)^2}{0.2}=2.16\,\text{J}$$

המשמעות הפיזיקלית של תשובה זו היא שהעבודה שיש להשקיע כנגד הכוחות החשמליים כדי לקרב את המטענים הנ"ל ממרחק אינסופי ביניהם עד למרחק $0.2\,\text{m}$ זה מזה, היא $2.16\,\text{J}$.

ב. האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של אחד המטענים הנ"ל בשדה הנוצר על ידי שני המטענים האחרים היא:

$$U=\frac{kq^2}{a}+\frac{kq^2}{a}=$$

$$=2\frac{\left(9\times10^9\right)\left(4\times10^{-6}\right)^2}{0.2}=1.44\,\text{J}$$

המשמעות הפיזיקלית של תשובה זו היא שהעבודה שיש להשקיע כנגד הכוח החשמלי, כדי להביא את המטען q ממרחק אינסופי משני המטענים האחרים הנמצאים בשני קודקודי המשולש, עד לקודקוד השלישי היא $1.44\,\text{J}$.

ג.

$$W\left(A\to B\right)=-\left(U_A-U_B\right)=U_B-U_A$$

כאשר:

$$U_B=\frac{kq^2}{a/2}\times2=4\frac{kq^2}{a}$$

$$U_A=\frac{kq^2}{a}\times2=2\frac{kq^2}{a}$$

$$\Rightarrow W\left(A\to B\right)=4\frac{kq^2}{a}-2\frac{kq^2}{a}=$$

$$=2\frac{kq^2}{a}=1.44\,\text{J}$$

ד. העבודה שהשדה החשמלי מבצע בתהליך זה נתונה על ידי:

$$W_{F_e}\left(1\to2\right)=-\left(U_2-U_1\right)=U_1-U_2$$

כאשר U_1 היא האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית הכוללת של המערכת במצב ההתחלתי, ו-U_2 היא האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית הכוללת של המערכת במצב הסופי.

לפי סעיף א: $U_1=2.16\,\text{J}$ ו:

$$U_2=3\frac{kq^2}{r_2}=$$

$$=3\frac{\left(9\times10^9\right)\left(4\times10^{-6}\right)^2}{0.1}=4.32\,\text{J}$$

לכן:

$$W_{F_e}=U_1-U_2=2.16-4.32=-2.16\,\text{J}$$

עבודה זו היא שלילית כי כיוון הכוח החשמלי הפועל בין המטענים, שהוא כוח דחייה, מנוגד במקרה זה לכיוון ההעתק, ולכן עבודתו שלילית.

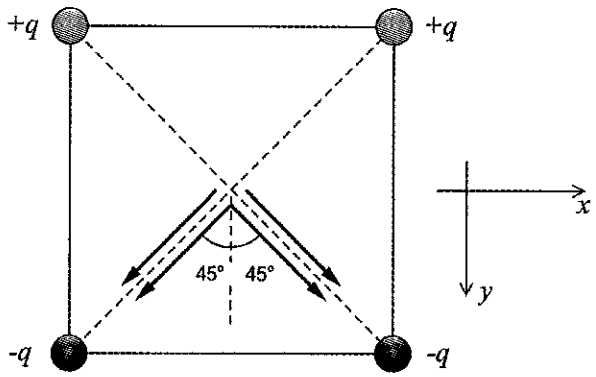
פתרון בעיה 7/ פרק 1

א. בתרשים א' השדה החשמלי השקול במרכזו של הריבוע הוא אפס. זאת, מאחר ששני השדות החשמליים הנוצרים על ידי כל שני מטענים על אותו אלכסון שווים בגודלם אך מנוגדים בכיוונם. לכן שדות אלה מבטלים זה את זה.

בתרשים ב', ארבעת השדות החשמליים הנוצרים על ידי ארבעת המטענים במרכזו של הריבוע שווים בגודלם, וכל אחד מהם שווה ל:

$$\frac{kq}{\left(a\sqrt{2}/2\right)^2}=\frac{2kq}{a^2}$$

כיוונם של שדות אלה הוא כמתואר בתרשים הבא:



במערכת הצירים המתוארת בתרשים נקבל:

$$\Sigma E_x = 0$$

$$\Sigma E_y = 4\left(\frac{2kq}{a^2}\right)\cos 45 = 8\left(\frac{kq}{a^2}\right)\frac{\sqrt{2}}{2} =$$

$$= 4\sqrt{2}\frac{kq}{a^2}$$

ב. הפוטנציאל במרכזו של הריבוע, בשני המקרים, שווה לאפס.

ג. מתקיים: $W_q(A \to B) = q(V_B - V_A)$, כאשר V_A ו-V_B הם הפוטנציאלים הנוצרים בנקודות A ו-B בהתאמה על ידי שאר שלושת המטענים.

בתרשים א' מקבלים:

$$V_A = 2\frac{k(-q)}{a} + \frac{k(+q)}{a\sqrt{2}} = \frac{kq}{a}\left(\frac{1}{\sqrt{2}} - 2\right)$$

$$V_B = 2\times\frac{k(-q)}{a\sqrt{2}/2} + \frac{k(+q)}{a\sqrt{2}/2} = -2\frac{kq}{a\sqrt{2}}$$

לכן נקבל:

$$W_q(A \to B) = q(V_B - V_A) =$$

$$= q\left[-2\frac{kq}{a\sqrt{2}} - \frac{kq}{a}\left(\frac{1}{\sqrt{2}} - 2\right)\right] =$$

$$= -3\frac{kq^2}{a\sqrt{2}} + \frac{2kq^2}{a} = \frac{kq^2}{a}\left(2 - \frac{3}{\sqrt{2}}\right) < 0$$

בתרשים ב' מקבלים:

$$V_A = \frac{k(-q)}{a} + \frac{k(+q)}{a} + \frac{k(-q)}{a\sqrt{2}} = -\frac{kq}{a\sqrt{2}}$$

$$V_B = 2\times\frac{k(-q)}{a\sqrt{2}/2} + \frac{k(+q)}{a\sqrt{2}/2} = -2\frac{kq}{a\sqrt{2}}$$

לכן נקבל:

$$W_q(A \to B) = q(V_B - V_A) =$$

$$= q\left[-2\frac{kq}{a\sqrt{2}} + \frac{kq}{a\sqrt{2}}\right] = -\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{kq^2}{a}$$

ד. האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית הכוללת של מערכת מטענים מסוימת היא סכום האנרגיות הפוטנציאליות החשמליות של כל זוגות המטענים השונים במערכת.

במקרה א' מקבלים:

$$U_1 = 4\left(\frac{k(+q)(-q)}{a}\right) + 2\frac{kq^2}{a\sqrt{2}} =$$

$$= \frac{kq^2}{a}\left(\frac{2}{\sqrt{2}} - 4\right) = -2.585\frac{kq^2}{a}$$

במקרה ב' מקבלים:

$$U_2 = 2\frac{kq^2}{a} + 2\frac{k(+q)(-q)}{a} + 2\frac{k(+q)(-q)}{a\sqrt{2}} =$$

$$= -\frac{2}{\sqrt{2}}\frac{kq^2}{a} = -1.414\frac{kq^2}{a}$$

ה. העבודה שיש להשקיע כדי לפרק את מערכת המטענים המתוארת בתרשים א' היא: $+2.58kq^2/a$. לעומת זאת, העבודה שיש להשקיע כדי לפרק את מערכת המטענים המתוארת בתרשים ב' היא: $+1.414kq^2/a$. כלומר, כדי לפרק את המערכת המתוארת בתרשים א' נדרשת עבודה גדולה יותר, ולכן היא קשורה יותר.

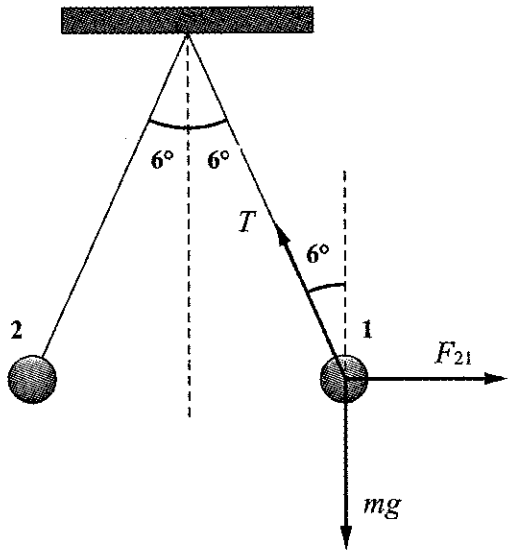
ככל שהאנרגיה הכוללת של המערכת קשורה (שהיא גודל שלילי) קטנה יותר בערכה המוחלט, המערכת תהיה קשורה פחות.

פתרון בעיה 8/ פרק 1

א. מאחר ונוצרת דחייה בין שני הכדורים, ניתן להסיק שהמטענים על שני הכדורים הם בעלי סימן זהה. כלומר, שניהם חיוביים או ששניהם שליליים.

לגבי גודל המטענים לא נוכל להסיק דבר, מאחר שהכוחות החשמליים הפועלים בין שני הכדורים הם כוחות פעולה ותגובה, השווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם אפילו אם המטענים על שני הכדורים אינם שווים בגודלם.

ב. נרשום את הכוחות הפועלים על אחד הכדורים, כמתואר בתרשים הבא, וניעזר בחוק הראשון של ניוטון.



$$(1)\quad F_{21}=\frac{kq_2(2q_2)}{(2\ell\sin 6)^2}=\frac{kq_2^2}{2\ell^2\sin^2 6}$$

מהחוק הראשון של ניוטון נקבל:

$$\Sigma F_x=0 \quad \Rightarrow F_{21}=T\sin 6$$

$$\Sigma F_y=0 \quad \Rightarrow mg=T\cos 6$$

משתי משוואות אלה מקבלים: $F_{21}=mg\tan 6$

. נציב F_{12} ממשוואה (1) ונקבל:

$$\frac{kq_2^2}{2\ell^2\sin^2 6}=mg\tan 6$$

$$\Rightarrow q_2=\pm\ell\sin 6\sqrt{\frac{2mg\tan 6}{k}}=$$

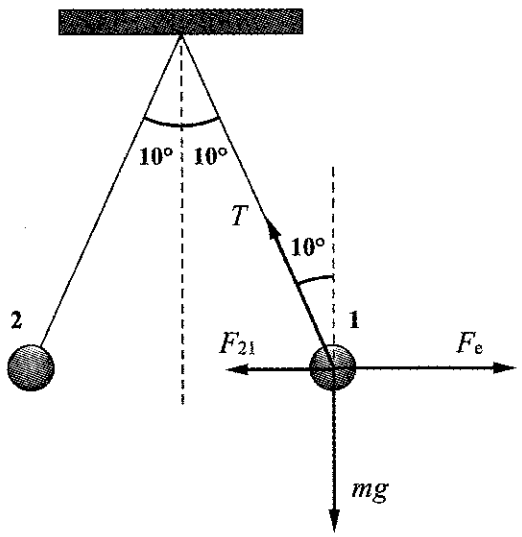
$$=\pm(0.2)\sin 6\sqrt{\frac{2\left(\frac{0.1}{1000}\right)g\tan 6}{9\times10^9}}=\pm3.2\,\text{nC}$$

$$\Rightarrow q_1=\pm6.4\,\text{nC}$$

ג. מאחר שכדור 1 סטה בכיוון השדה החשמלי, ניתן להסיק שהמטען עליו חיובי. לעומת זאת, כדור 2 סטה נגד כיוון השדה החשמלי, לכן ניתן להסיק שהמטען עליו שלילי.

בנוסף לכך, מאחר שהזוויות בין כל חוט לאנך זהות, אנו למדים שהכוחות המופעלים על המטענים על ידי השדה החשמלי שווים בגודלם. מאחר וכוחות אלה הם: $|q_1|E$ ו- $|q_2|E$, נקבל ש: $|q_1|=|q_2|$, לכן המטענים על שני הכדורים שווים בגודלם ומנוגדים בסימנם, כאשר q_1 חיובי ו-q_2 שלילי.

ד. נרשום את הכוחות הפועלים על אחד הכדורים, כמתואר בתרשים הבא:



כאשר:

$$(1)\quad F_{21}=\frac{k|q_1||q_2|}{(2\ell\sin 10)^2}=\frac{kq^2}{4\ell^2\sin^2 10}$$

$$(2)\quad F_e=|q_1|E=qE$$

כאשר מתקיים $q=|q_1|=|q_2|$. מהחוק הראשון של ניוטון נקבל:

$$\Sigma F_x=0 \quad \Rightarrow qE=T\sin 10+\frac{kq^2}{4\ell^2\sin^2 10}$$

$$\Sigma F_y=0 \quad \Rightarrow mg=T\cos 10$$

נציב T מהמשוואה השנייה במשוואה הראשונה ונקבל:

$$qE=\frac{mg}{\cos 10}\sin 10+\frac{kq^2}{4\ell^2\sin^2 10}$$

$$1.865\times10^{12}q^2-10^5q+1.76\times10^{-4}=0$$

$$q^2-5.36\times10^{-8}q+9.45\times10^{-17}=0$$

מפתרון המשוואה האחרונה מתקבל:

$q_1=+5.17\times10^{-8}\,\text{C}$ ו- $q_2=-5.17\times10^{-8}\,\text{C}$

או:

$q_1=1.8\times10^{-9}\,\text{C}$ ו- $q_2=-1.8\times10^{-9}\,\text{C}$

פתרון בעיה 9/ פרק 1

א. $W_F=U_2-U_1$, כאשר: $U_2=U_\infty=0$

$$U_1=2\frac{k(5\,\text{nC})(-6\,\text{nC})}{0.1}+\frac{k(5\,\text{nC})^2}{0.1\sqrt{2}}=$$

$$=2\left(-2.7\times10^{-6}\right)+1.6\times10^{-6}=-3.8\times10^{-6}\,\text{J}$$

לכן נקבל:

$$W_F = U_2 - U_1 = 0 - \left(-3.8\times10^{-6}\,\text{J}\right) =$$
$$= 3.8\times10^{-6}\,\text{J}$$

ב. מאחר שהעבודה שיש לבצע כדי להרחיק את המטענים זה מזה למרחק אינסופי היא חיובית, ניתן להסיק שהמערכת קשורה.

ג. $W = U_2 - U_1$, כאשר U_2 היא האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של המטען q_2 כשהוא במרכז הריבוע:

$$U_2 = \frac{k(5\,\text{nC})(-6\,\text{nC})}{0.1\sqrt{2}/2} + \frac{k(-6\,\text{nC})(5\,\text{nC})}{0.1\sqrt{2}/2} =$$
$$= -7.63\times10^{-6}\,\text{J}$$

ו-U_1 היא האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית ההתחלתית של המטען q_2:

$$U_1 = \frac{k(5\,\text{nC})(-6\,\text{nC})}{0.1} + \frac{k(5\,\text{nC})(-6\,\text{nC})}{0.1} =$$
$$= -5.4\times10^{-6}\,\text{J}$$

לכן מקבלים:

$$W_F = U_2 - U_1 =$$
$$= -7.63\times10^{-6}\,\text{J} - \left(-5.4\times10^{-6}\,\text{J}\right) =$$
$$= -2.23\times10^{-6}\,\text{J}$$

ד. יש להניח מטען q' שמקיים:

$$V_O = 2\times\frac{k(5\,\text{nC})}{0.1\sqrt{2}/2} + \frac{k(-6\,\text{nC})}{0.1\sqrt{2}/2} + \frac{k(q')}{0.1\sqrt{2}/2} = 0$$
$$\Rightarrow \frac{8k(\text{nC})}{0.1\sqrt{2}} + \frac{2k(q')}{0.1\sqrt{2}} = 0$$
$$\Rightarrow q' = -4\,\text{nC}$$

ה. השדה החשמלי השקול של המטענים q_1 ו-q_3 במרכז הריבוע הוא אפס. לכן כדי שהשדה החשמלי השקול במרכזו של הריבוע יתאפס, יש להניח בקוקוד הרביעי של הריבוע מטען השווה למטען q_2, כלומר $q' = -6\,\text{nC}$.

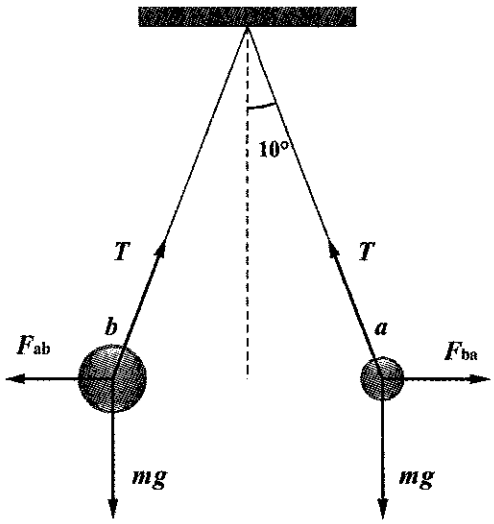
פתרון בעיה 10/ פרק 1

א.

$$\frac{kq_a}{R_a} = V \quad \Rightarrow q_a = \frac{R_a V}{k}$$
$$\frac{kq_b}{R_b} = V \quad \Rightarrow q_b = \frac{R_b V}{k}$$

$$\Rightarrow \frac{q_b}{q_a} = \frac{R_b V/k}{R_a V/k} = \frac{R_b}{R_a} = 2$$

ב. נרשום את הכוחות הפועלים על כל אחד משני הכדורים, כפי שמתואר בתרשים הבא:



מאחר ו- $m_a g = m_b g$ ו- $F_{ab} = -F_{ba}$, נקבל שהזווית השנייה שווה גם היא ל-10°.

אפשר להגיע לתוצאה זו גם באופן הבא: אם נסמן את הזווית שבין החוט הראשון לאנך ב-α, ואת הזווית שבין החוט השני לאנך ב-β, נקבל מהחוק הראשון של ניוטון:

$$T\sin\alpha = |F_{ba}|$$
$$T\cos\alpha = mg$$

מכאן נקבל:

$$\tan\alpha = \frac{|F_{ba}|}{mg}$$

באותה דרך נקבל:

$$\tan\beta = \frac{|F_{ab}|}{mg}$$

מאחר ש-$|F_{ab}| = |F_{ba}|$, נקבל משתי המשוואות האחרונות ש-$\tan\alpha = \tan\beta$, ומכיוון שזוויות אלה הן בין 0 ל-90 מעלות נקבל ש-$\alpha = \beta$.

ג. מתוך הקשר שהתקבל בסעיף הקודם: $\tan\alpha = \frac{|F_{ba}|}{mg}$, נקבל:

$$\frac{kq_a q_b}{(2\ell\sin\alpha)^2 mg} = \tan\alpha$$
$$\Rightarrow q_a q_b = \frac{(2\ell\sin\alpha)^2 mg\tan\alpha}{k}$$

מאחר ש- $q_b = 2q_a$, נקבל:

$$2q_a^2 = \frac{(2\ell\sin\alpha)^2 mg\tan\alpha}{k}$$

$$\Rightarrow q_a = \pm 2\ell\sin\alpha\sqrt{\frac{mg\tan\alpha}{2k}} =$$

$$= \pm 2(0.3)\sin 10\sqrt{\frac{\frac{2}{1000}10\tan 10}{2\times(9\times10^9)}}$$

$$\Rightarrow q_a = \pm 4.6\times10^{-8}\,\text{C}$$

$$\Rightarrow q_b = \pm 9.2\times10^{-8}\,\text{C}$$

מאחר שהמטענים חיוביים (כי נתון שהפוטנציאל V חיובי), נבחר את הסימנים החיוביים.

ד. מאחר ש- $\tan\alpha = \frac{|F_{ba}|}{m_a g}$ ו- $\tan\beta = \frac{|F_{ab}|}{m_b g}$,

ומאחר שתמיד מתקיים ש: $|F_{ba}| = |F_{ab}|$, אזי אם $m_a g \neq m_b g$ נקבל ש- $\alpha \neq \beta$ לכל יחס שבין המטענים.

פתרון בעיה 11/ פרק 1

א. נסמן את המטענים על שני הכדורים 1 ו-2 לאחר המגע ביניהם ב- q_1 ו- q_2, בהתאמה. משימור המטען נקבל:

$$(1)\quad q_1 + q_2 = 6\times10^{-8}\,\text{C}$$

ומשוויון הפוטנציאלים על שני הכדורים נקבל:

$$\frac{kq_1}{R_1} = \frac{kq_2}{R_2}$$

$$(2)\quad q_1 = \frac{R_1}{R_2}q_2 = 2q_2$$

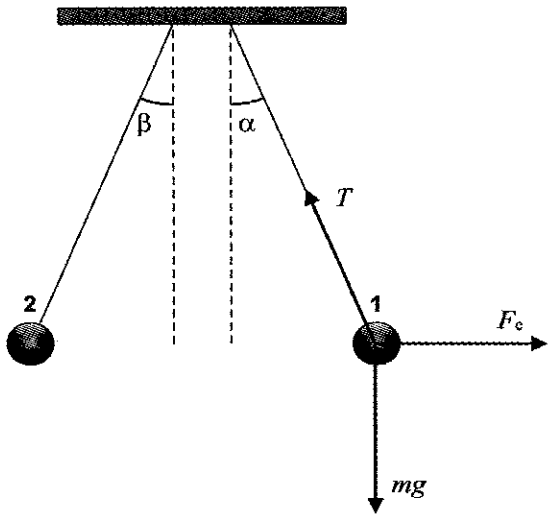
נציב משוואה (2) ב-(1) ונקבל:

$$3q_2 = 6\times10^{-8}C$$

$$\Rightarrow q_2 = 2\times10^{-8}\,\text{C} \qquad \Rightarrow q_1 = 4\times10^{-8}C$$

ב. מאחר וכוחות הדחייה החשמליים הם כוחות פעולה ותגובה, השווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם, ומאחר שמסות שני הכדורים זהות, נקבל: $\alpha = \beta$.

ג. נרשום את הכוחות הפועלים על אחד הכדורים (למשל הכדור 1), כפי שמתואר בתרשים הבא, ונשתמש בחוק הראשון של ניוטון:



$$(1)\quad T\sin\alpha = \frac{kq_1q_2}{d^2}$$

$$(2)\quad T\cos\alpha = mg$$

$$\tan\alpha = \frac{kq_1q_2}{mgd^2} =$$

$$= \frac{9\times10^9(4\times10^{-8})(2\times10^{-8})}{\frac{8}{1000}(10)(0.03)^2} = 0.1$$

$$\Rightarrow \alpha = 5.7^\circ$$

ד. מתקיים:

$$\ell = \frac{1.5\,\text{cm}}{\sin 5.7} = 15.1\,\text{cm}$$

ה.

$$W_{F_e}(1\to2) = -(U_2 - U_1) =$$

$$= \frac{kq_1q_2}{r_1} - \frac{kq_1q_2}{r_2} = kq_1q_2\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) =$$

$$= 9\times10^9(4\times10^{-8})(2\times10^{-8})\left(\frac{1}{0.03} - \frac{1}{0.015}\right) =$$

$$= -2.4\times10^{-4}\,\text{J}$$

פתרון בעיה 12/ פרק 1

א. $E = 2\pi k\sigma = 311\,\text{N/C}$ בכיוון ניצב ללוח החוצה.

ב. נבחר את הכיוון החיובי כלפי מעלה, ונקבל מהחוק הראשון של ניוטון:

$$qE + (-mg) = 0$$

$$\Rightarrow q = \frac{mg}{E} = \frac{\frac{2}{1000}\times10}{311} = 6.43\times10^{-5}\,\text{C}$$

ג.

(1) נוצר קיטוב של המטען בלוח העבה. מטען חיובי מצטבר בצד העליון של הלוח העבה, ומטען שלילי השווה לו בגודלו (בערך מוחלט) מצטבר בצד התחתון של הלוח. הקיטוב נמשך עד לרגע שבו השדה החשמלי השקול בתוך הלוח העבה מתאפס. כלומר, עד לרגע שבו השדה הנוצר כתוצאה מהקיטוב של המטען שווה בגודלו אך מנוגד בכיוונו לשדה של הלוח הדק.

(2) השדה הנוצר בתוך הלוח העבה כתוצאה מהקיטוב של המטען נתון על ידי: $4\pi k|\sigma'|$, כאשר σ' היא צפיפות המטען המשטחית הנוצרת על הצדדים העליון והתחתון של הלוח העבה. לפי ההסבר בתת סעיף ג(1), צריך להתקיים:

$$4\pi k|\sigma'| = 311 \Rightarrow |\sigma'| = 2.75\,\text{nC/m}^2$$

לכן על הצד העליון של הלוח העבה הצפיפות המשטחית היא: $\sigma = +2.75\,\text{nC/m}^2$, ועל צדו התחתון: $\sigma = -2.75\,\text{nC/m}^2$.

(3) אפס.

פתרון בעיה 13/ פרק 1

א. הלוח המחובר לקוטב החיובי של מקור המתח (הלוח b בתרשים) נמצא בפוטנציאל גבוה יותר ואילו הלוח המחובר לקוטב השלילי (הלוח a בתרשים) של מקור המתח נמצא בפוטנציאל יותר נמוך.

ב. מאחר והפוטנציאל בנקודה מסוימת מבטא את האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית ליחידת מטען הנמצא בנקודה זו נקבל שהמשמעות של $V_b - V_a = 3000\,\text{V}$ היא שההפרש בין האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של מטען חיובי שגודלו קולון אחד והנמצא על הלוח b (הלוח החיובי) ובין האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית שלו כאשר הוא נמצא על הלוח a (הלוח השלילי) הוא $3{,}000\,\text{J}$.

משמעות נוספת ניתן לקבל מהקשר הבא: אם מטען חיובי q עובר מלוח b (החיובי) אל הלוח a (השלילי) בהשפעת הכוח החשמלי המופעל עליו על ידי השדה החשמלי, אז עבודת הכוח החשמלי המתבצעת בתהליך זה נתונה על ידי:

$$W_q(b \to a) = U_b - U_a = q(V_b - V_a)$$

מקשר זה מתקבל:

$$V_b - V_a = \frac{W_q(b \to a)}{q}$$

מאחר ו- $V_b - V_a = 3{,}000\,\text{V}$, נקבל:

$$\frac{W_q(b \to a)}{q} = 3{,}000\,\text{V} = 3{,}000\,\text{J/C}$$

מכאן שמשמעות הביטוי $V_b - V_a = 3{,}000\,\text{V}$ היא שעבודת הכוח החשמלי המתבצעת בהעברת מטען שגודלו $1\,\text{C}$ מהלוח החיובי אל הלוח השלילי היא $3{,}000\,\text{J}$.

ג. נשתמש בקשר: $E = -\dfrac{V_a - V_b}{y_a - y_b}$

נבחר את הכיוון החיובי של ציר y בכיוון מעלה (מ- b אל a) ואת $y = 0$ על הלוח החיובי (הלוח b). מכאן נקבל: $V_b = 0$, $V_a = -3000\,\text{V}$, $y_b = 0$ ו- $y_a = 0.1\,\text{m}$. נציב ונקבל:

$$E = -\frac{V_a - V_b}{y_a - y_b} = -\frac{(-3000) - 0}{0.1 - 0} =$$
$$= 30{,}000\,\text{N/C}$$

השדה שהתקבל חיובי, כלומר הוא מכוון בכיוון החיובי של הציר (כלפי מעלה).

ד. ככל ש- y_a בקשר בסעיף הקודם קטן, השדה גדל. לכן נקבל:

$$E_{\max} = -\frac{V_a - V_b}{y_{a\min} - 0} = -\frac{(-3000) - 0}{y_{a\min}}$$

$$\Rightarrow y_{a\min} = \frac{3000}{E_{\max}} = \frac{3000}{3\times10^6} = 10^{-3}\,\text{m} = 1\,\text{mm}$$

ה. האלקטרונים נעים מהלוח השלילי אל הלוח החיובי. כלומר, מהלוח a אל הלוח b. על מנת לחשב את מהירות הפגיעה שלהם בלוח החיובי, ניעזר בחוק שימור האנרגיה:

$$\tfrac{1}{2}m_e v_b^2 + q_e V_b = \tfrac{1}{2}m_e v_a^2 + q_e V_a$$
$$\tfrac{1}{2}m_e v_b^2 + 0 = 0 + (-e)(-3000)$$

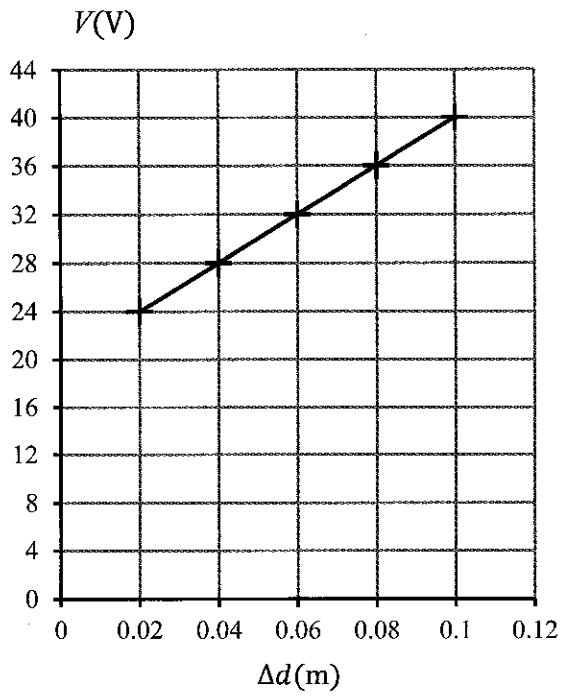
$$v_2 = \pm\sqrt{\frac{6000e}{m_e}} = \pm\sqrt{\frac{6000(1.6\times10^{-19})}{9.11\times10^{-31}}} =$$

$=\pm 3.25\times 10^{7}\ \mathrm{m/s}$

נבחר בסימן השלילי כי האלקטרונים נעים בכיוון השלילי של הציר שבחרנו בבעיה זו.

פתרון בעיה 14/ פרק 1

א.



ב. נשתמש בקשר:

$$V_2 - V_1 = -E\left(y_2 - y_1\right)$$

נבחר את הכיוון החיובי של ציר y כלפי מעלה ואת $y=0$ על הלוח התחתון. נקבל: $V_1 = 0$, $V_2 = V$, $y_1 = 0$ ו- $y_2 = d_0 + \Delta d$.

נציב ונקבל:

$$V_2 - V_1 = -E\left(y_2 - y_1\right)$$
$$\Rightarrow V - 0 = -E\left[\left(\Delta d + d_0\right) - 0\right]$$
$$\Rightarrow V = -E\Delta d - Ed_0$$

הגודל $-Ed_0$ הוא המתח ההתחלתי V_0 (שים לב כי הגודל E הוא שלילי בהתאם לציר שבחרנו). לכן נקבל:

$$V = -E\Delta d + V_0$$

ג.

(1) שיפוע הגרף מייצג הגודל $-E$. שיפוע הגרף הוא $200\ \mathrm{V/m}$. מכאן: $E = -200\ \mathrm{V/m}$. השדה שלילי כי הוא מכוון כלפי מטה (בכיוון השלילי).

(2) מאחר שמתקיים שגודל השדה בין הלוחות נתון על ידי: $|E| = 4\pi k|\sigma|$, נקבל:

$$|\sigma| = \frac{|E|}{4\pi k} = \frac{200}{4\pi\left(9\times 10^{9}\right)} = 1.77\times 10^{-9}\ \mathrm{C/m^2}$$

מכאן, המטען על הלוח החיובי הוא:

$$Q = \sigma A = \left(1.77\times 10^{-9}\ \mathrm{C/m^2}\right)\left(0.8\,\mathrm{m^2}\right) =$$
$$= +1.42\times 10^{-9}\ \mathrm{C}$$

וזה שעל הלוח השלילי:

$$Q = -1.42\times 10^{-9}\ \mathrm{C}$$

(3) על פי המשוואה שהתקבלה בסעיף ב', V_0 הוא החיתוך עם הציר האנכי, ולפי הגרף מתקבל: $V_0 = 20\,\mathrm{V}$.

(4) מתוך הקשר:

$$E = -\frac{\Delta V}{\Delta y} = -\frac{20}{d_0}$$
$$\Rightarrow d_0 = -\frac{20}{E} = -\frac{20}{-200} = 0.1\,\mathrm{m}$$

ד. כל אחד משני הלוחות נמצא תחת השפעת השדה החשמלי הנוצר על ידי הלוח האחר וגודלו $\frac{1}{2}E = 100\ \mathrm{V/m}$, לכן הכוח החשמלי שפועל על כל לוח נתון על ידי:

$$F = Q\left(\tfrac{1}{2}E\right) = \left(1.42\times 10^{-9}\right)\left(100\right) =$$
$$= 1.42\times 10^{-7}\ \mathrm{N}$$

ה. בהנחה שהשדה החשמלי בין הלוחות אחיד, נקבל שהכוח החשמלי המופעל על כל לוח הוא קבוע. לכן נקבל:

$$W = F_{\parallel}\Delta y = F\left(3d_0 - d_0\right) = 2.84\times 10^{-8}\ \mathrm{J}$$

<u>גישה אחרת:</u>

$W_F = U_2 - U_1$ כאשר U היא האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של המטען Q הנמצא על הלוח העליון ביחס ללוח התחתון. אנרגיה זו נתונה על ידי הגודל: $U = -QEy$. לכן נקבל:

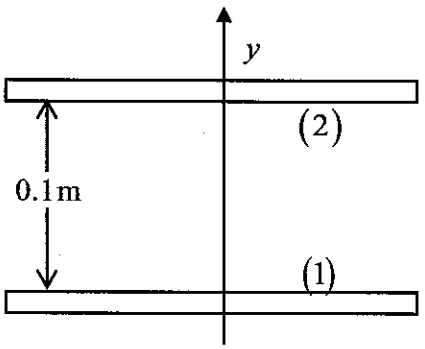
$$W_F = U_2 - U_1 = \left(-QE'y_2\right) - \left(-QEy_1\right) =$$
$$= QE'\left(y_1 - y_2\right)$$
$$= \left(1.42\times 10^{-9}\right)\left(-100\right)\left(d_0 - 3d_0\right) =$$
$$= 2.84\times 10^{-8}\ \mathrm{J}$$

פתרון בעיה 15/ פרק 1

א. אם נבחר את הכיוון החיובי של ציר y כלפי מעלה ואת $y=0$ על הלוח התחתון, כפי שמתואר בתרשים הבא, נקבל:

$$E=-\frac{V_2-V_1}{y_2-y_1}=-\frac{800-0}{0.1-0}=-8000\,\text{V/m}$$

השדה שלילי, כלומר הוא מכוון בכיוון השלילי של הציר, כלפי מטה.



ב. מאחר שטיפת השמן נמצאת במצב של שווי משקל נקבל:

$$\Sigma F_y=0 \Rightarrow qE+(-mg)=0$$

$$\Rightarrow q(-8000)=(4\times10^{-6})(10)$$

$$\Rightarrow q=-5\times10^{-9}\,\text{C}=-5\,\text{nC}$$

מכאן שהמטען שעל טיפת השמן שלילי.

ג.

(1) כעת נבחר את $y=0$ על הלוח העליון, ונקבל שהפוטנציאל של הלוח התחתון ביחס ללוח העליון הוא $-800\,\text{V}$. לכן הקבל ש:

$$U=qV=(-5\times10^{-9})(-800)=4\times10^{-6}\,\text{J}$$

(2) כאשר מניחים את טיפת השמן בקרבת הלוח השלילי היא תישאר במצב של שיווי משקל. זאת, מאחר שהשדה החשמלי בין הלוחות הוא אחיד, ואינו משתנה עם המרחק מהלוחות.

ד.

(1) כתוצאה מהקטנת המתח, השדה החשמלי בין הלוחות קטן, ולכן גם הכוח החשמלי המופעל על המטען השלילי שנמצא על טיפת השמן כלפי מעלה קטן. כתוצאה מכך תתחיל טיפת השמן לנוע לכיוון מטה בתאוצה, וזאת בהשפעת הכוח השקול הפועל עליה.

(2) תאוצת טיפת השמן כלפי מטה נתונה על ידי:

$$a=\frac{\Sigma F}{m}=\frac{F_g+F_e}{m}=\frac{-mg+\frac{1}{2}mg}{m}=-5\,\text{m/s}^2$$

זכור, כי הכיוון החיובי הוא כלפי מעלה.

מהירות הפגיעה מתקבלת על ידי:

$$v^2=v_0^2+2a\Delta y$$

$$\Rightarrow v=\pm\sqrt{2(-5)(-0.05)}=\pm0.71\,\text{m/s}$$

נבחר בתוצאה השלילית.

פתרון בעיה 16/ פרק 1

א. העבודה שיש לבצע כנגד הכוח החשמלי, בהעברת מטען נקודתי מנקודה 1 אל נקודה 2, נתונה על ידי: $W(1\to2)=U_2-U_1$, כאשר U_1 היא האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של המטען הנקודתי בנקודה 1, ו-U_2 היא האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של המטען הנקודתי בנקודה 2.

האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של מטען נקודתי q בשדה חשמלי אחיד E נתונה על ידי הביטוי:

$$U=-qEx$$

כאשר x הוא המרחק ממישור הייחוס.

נבחר את הכיוון החיובי של ציר x בכיוון השדה, ואת $x=0$ בנקודה N, ונקבל:

(1)

$$W(N\to K)=U_K-U_N=-qE(x_K-x_N)=0$$

(2)

$$W(N\to M)=U_M-U_N=-qE(x_M-x_N)=$$
$$=-(2\times10^{-6})(+1000)(0.2-0)=-4\times10^{-4}\,\text{J}$$

(3)

$$W(N\to L)=U_L-U_N=U_M-U_N=$$
$$=-4\times10^{-4}\,\text{J}$$

ב. הפוטנציאל בשדה חשמלי אחיד נתון על ידי: $V(x)=-Ex$, לכן נקבל:

(1)

$$V_{NK}=-E(x_N-x_K)=0$$

(2)

$$V_{NM}=-E(x_N-x_M)=$$
$$=-(+1000)(0-0.2)=200\,\text{V}$$

(3)

$$V_{NL} = -E\left(x_N - x_L\right) =$$
$$= -\left(+1000\right)\left(0 - 0.2\right) = 200\,\text{V}$$

דרך נוספת לפתרון היא על ידי שימוש בקשר:

$$V_{12} = \frac{W(1 \to 2)}{q} = \frac{-\left(U_2 - U_1\right)}{q}$$

כלומר הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות שווה לעבודת השדה החשמלי המתבצעת בהעברת יחידת מטען בין שתי נקודות אלה.

מכאן נקבל:

$$V_{KN} = V_K - V_N = \frac{-\left(U_K - U_N\right)}{q} = 0$$

$$V_{NM} = \frac{-\left(U_M - U_N\right)}{q} = \frac{-\left(-4\times10^{-4}\,\text{J}\right)}{2\times10^{-6}} = 200\,\text{V}$$

$$V_{NL} = \frac{-\left(U_L - U_N\right)}{q} = \frac{-\left(-4\times10^{-4}\,\text{J}\right)}{2\times10^{-6}} = 200\,\text{V}$$

ג. נבחר את הכיוון החיובי בכיוון קווי השדה החשמלי, ונקבל שהתאוצה (התאוטה) של האלקטרון היא:

$$a = \frac{q_e E}{m_e} = -\frac{eE}{m_e}$$

לכן נקבל:

$$\Delta x = \frac{0 - v_0^2}{2a} = \frac{\frac{1}{2}m_e v_0^2}{eE} =$$
$$= \frac{\frac{1}{2}\left(9.11\times10^{-31}\right)\left(7\times10^{6}\right)^2}{\left(1.6\times10^{-19}\right)1000} = 0.1395\,\text{m}$$

ד. בשל שימור האנרגיה מתקיים:

$$U_1 + K_1 = U_2 + K_2$$
$$q_e V_1 - q_e V_2 = 0 - K_1$$
$$V_{12} = \frac{-\frac{1}{2}m_e v_1^2}{q_e} =$$
$$= \frac{-\frac{1}{2}\left(9.11\times10^{-31}\right)\left(7\times10^{6}\right)^2}{-1.6\times10^{-19}} = 139.5\,\text{V}$$

דרך נוספת:

$$V_{12} = -E\left(x_1 - x_2\right) =$$
$$= -\left(+1000\right)\left(0 - 0.1395\right) = 139.5\,\text{V}$$

ה. מהקשר: $v = v_0 + at$, נקבל שהזמן עד שהמהירות של האלקטרון מתאפסת נתון על ידי: $t = -v_0 / a$. נציב את התאוצה מסעיף ג' ונקבל:

$$t = \frac{-v_0}{a} = \frac{-v_0}{-eE / m_e} = \frac{m_e v_0}{eE} =$$
$$= \frac{(9.11\times10^{-31})(7\times10^{6})}{(1.6\times10^{-19})(1000)} = 3.99\times10^{-8}\,\text{s}$$

פתרון בעיה 17/ פרק 1

א. מאחר שהחלקיק טעון במטען חיובי, והוא נע לעבר הלוח העליון, ניתן להסיק שהלוח העליון שלילי ושהלוח התחתון חיובי.

גישה אחרת: המטענים החיוביים נעים בתאוצה מפוטנציאל גבוה אל פוטנציאל נמוך, לכן הלוח העליון נמצא בפוטנציאל נמוך ואילו התחתון בפוטנציאל גבוה, מכאן שהלוח העליון הוא שלילי והתחתון הוא חיובי (שים לב! נתון שאחד הלוחות הוא חיובי והאחר הוא שלילי).

ב. נשתמש בחוק שימור האנרגיה עבור החלקיק בין שתי הנקודות A ו- B:

$$U_A + \tfrac{1}{2}mv_A^2 = U_B + \tfrac{1}{2}mv_B^2$$
$$q\left(V_A - V_B\right) = \tfrac{1}{2}mv_B^2 - \tfrac{1}{2}mv_A^2$$
$$\Rightarrow \left(4\times10^{-9}\right)V_{AB} = \tfrac{1}{2}\left(2\times10^{-10}\right)\left(200\right)^2 - 0$$
$$\Rightarrow V_{AB} = 1000\,\text{V}$$

מכאן נקבל ש: $V_{BA} = V_B - V_A = -1{,}000\,\text{V}$.

הערה: בחוק שימור האנרגיה הזנחנו את האנרגיה הפוטנציאלית הגרביטציונית של החלקיק בגלל שכוח הכובד הפועל עליו זניח ביחס לכוח החשמלי הפועל עליו (נא לבדוק!).

ג. כדי לחשב את השדה החשמלי נשתמש בקשר $E = -V_{BA} / y_{BA}$. נבחר את הכיוון החיובי של ציר y כלפי מעלה, ואת $y = 0$ על הלוח התחתון, ונקבל:

$$E = -\frac{V_{BA}}{y_{BA}} = -\frac{V_B - V_A}{y_B - y_A} = -\frac{-1000}{0.1 - 0.02} =$$
$$= 12{,}500\,\text{V/m}$$

השדה שהתקבל הוא חיובי, ולכן הוא מכוון בכיוון החיובי, כלומר כלפי מעלה, מלוח 1 אל לוח 2.

ד. נשתמש בקשר: $V_1 - V_2 = -E\left(y_1 - y_2\right)$,

ובאותו ציר שבחרנו בסעיף הקודם, ונקבל:

$$V_1 - V_2 = -(+12,500)(0-0.1) = 1,250\,\text{V}$$

ה. כאשר אחד הלוחות הוא חיובי והאחר שלילי, ומתקיים: $|\sigma_1| = |\sigma_2| = \sigma$, כאשר σ היא הצפיפות המשטחית של המטען על הלוחות, מתקיים הקשר הבא: $E = 4\pi k\sigma$. לכן נקבל:

$$\sigma = \frac{E}{4\pi k} = \frac{12,500}{4\pi(9\times10^9)} = 1.105\times10^{-7}\ \text{C/m}^2$$

מכאן:

$$\sigma_1 = +1.105\times10^{-7}\ \text{C/m}^2$$

$$\sigma_2 = -1.105\times10^{-7}\ \text{C/m}^2$$

ו.

(1) נשתמש בחוק שימור האנרגיה בין שתי הנקודות C ו-D ונקבל:

$$U_C + \tfrac{1}{2}mv_C^2 = U_D + \tfrac{1}{2}mv_D^2$$

$$q(V_C - V_D) = \tfrac{1}{2}mv_D^2 - \tfrac{1}{2}mv_C^2$$

$$(4\times10^{-9})V_{CD} = 0 - \tfrac{1}{2}(2\times10^{-10})(180)^2$$

$$\Rightarrow V_{CD} = -810\,\text{V}$$

(2) מתקיים: $V_{CD} = -E(y_C - y_D)$. בהתאם לציר שבחרנו בסעיפים הקודמים, נקבל:

$$-810 = -(12,500)(x_C - x_D)$$

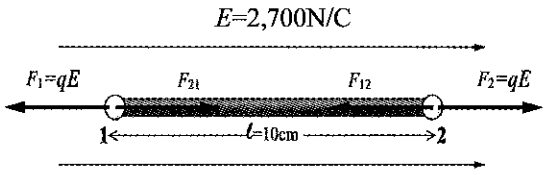
$$\Rightarrow x_C - x_D = 0.0648\,\text{m} = 6.48\,\text{cm}$$

פתרון בעיה 18/ פרק 1

א. כתוצאה מהכוח החשמלי המופעל על המטענים החשמליים שבתוך המוט (על האלקטרונים מופעל כוח המנוגד לכיוון השדה החשמלי, ועל הפרוטונים מופעל כוח בכיוון השדה החשמלי), נוצר קיטוב במוט. אלקטרונים חופשיים נעים לעבר הקצה השמאלי של המוט ומצטברים שם, כשהם עוזבים מאחוריהם אותו מספר של פרוטונים בקצה האחר של המוט (הקצה הימני). שים לב שהפרוטונים אינם נעים בתוך החומר.

כתוצאה מכך, נוצר מטען חיובי $+q$ בקצה הימני של המוט, ומטען $-q$ בקצה השמאלי שלו.

ב. הקיטוב נמשך עד לרגע שבו כוח המשיכה בין שני המטענים $+q$ ו-$-q$, שהוא kq^2/ℓ^2, משתווה לכוח החשמלי qE הפועל על כל אחד מהמטענים כתוצאה מהשדה החשמלי, (ראה את התרשים הבא).



מתנאי זה מתקבל:

$$\frac{k|q|^2}{\ell^2} = qE$$

$$\Rightarrow |q| = \frac{E\ell^2}{k} = \frac{2700(0.1)^2}{9\times10^9} = 3\times10^{-9}\,\text{C} = 3\,\text{nC}$$

$$\Rightarrow q_1 = -3\,\text{nC},\quad q_2 = 3\,\text{nC}$$

ג.

(1) כדי שיהיה אפשר להגיע למצב שווי משקל עבור המטענים, צריך שיתקיים שהמטען מצד ימין חיובי והמטען מצד שמאל הוא שלילי.

(2) ממצב שווי המשקל מקבלים:

$$\frac{k|q|^2}{x^2} = qE$$

$$\Rightarrow x = \sqrt{\frac{k|q|}{E}} = \sqrt{\frac{9\times10^9(5\times10^{-9})}{2700}} =$$

$$= 0.13\,\text{m} = 13\,\text{cm}$$

(3) העבודה שיש להשקיע על מנת להעביר את המטען שמצד ימין (המטען החיובי) עד למחצית המרחק שלו מהמטען האחר היא:

$$W = U_2 - U_1$$

כאשר האנרגיה הפוטנציאלית בכל נקודה מורכבת משתי תרומות: הראשונה כתוצאה מהשדה החשמלי של המטען האחר (שמצד שמאל) והשנייה מהשדה החשמלי האחיד.

נבחר את הכיוון החיובי של ציר x בכיוון השדה ואת $x=0$ בנקודה שבה נמצא המטען משמאל (המטען השלילי) כפי שמתואר בתרשים בהמשך.

מתקיים:

$$U_1 = \frac{kq_1q_2}{x_1} + (-q_1Ex_1)$$

$$U_2 = \frac{kq_1q_2}{x_2} + (-q_1Ex_2)$$

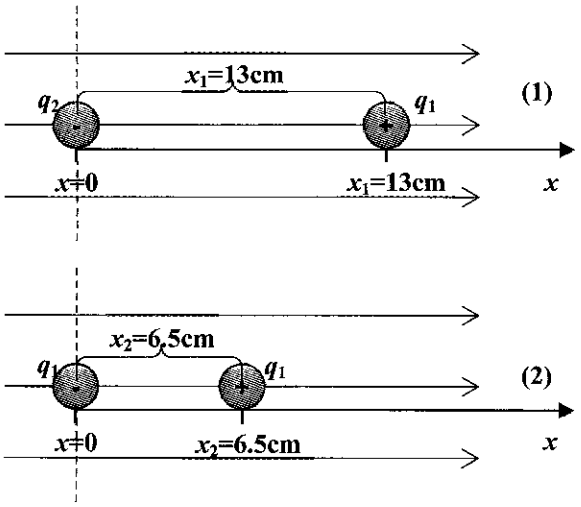
$$\Rightarrow W=\frac{kq_1q_2}{x_2}-\frac{kq_1q_2}{x_1}+q_1Ex_1-q_1Ex_2=$$

$$=kq_1q_2\left(\frac{1}{x_2}-\frac{1}{x_1}\right)+q_1E\left(x_1-x_2\right)=$$

$$=\left(9\times10^9\right)\left(5\,\text{nC}\right)\left(-5\,\text{nC}\right)\left(\frac{1}{0.065}-\frac{1}{0.13}\right)+$$

$$+\left(5\,\text{nC}\right)\left(2700\right)\left(0.13-0.065\right)=$$

$$=-8.53\times10^{-7}\,\text{J}$$



העבודה שהתקבלה שלילית, כלומר הם מתקרבים בהשפעת הכוח החשמלי השקול שפועל עליהם ואנו מרוויחים אנרגיה מתהליך זה.

פתרון בעיה 19/ פרק 1

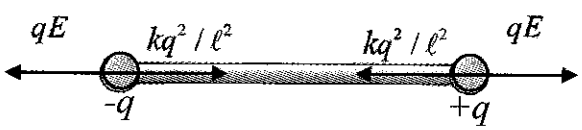
א.

$$E=2\pi k\sigma=2\pi\left(9\times10^9\right)\left(4\times10^{-9}\right)=$$

$$=226.2\,\text{N/C}$$

השדה ניצב ללוח בכיוון החוצה ממנו.

ב. כתוצאה מהשדה החשמלי שיוצר הלוח הטעון, נוצר קיטוב של המטען במוט. בקצה המוט הקרוב ללוח מצטבר מטען שלילי $-q$, ובצדו האחר מצטבר מטען חיובי $+q$, כפי שמתואר בתרשים הבא:



קיטוב המטענים במוט נמשך עד לרגע שבו הכוח השקול על המטענים המושרים בקצוות המוט מתאפס, וזה מתקיים כאשר כוח המשיכה הפועל בין המטענים המושרים שבקצוות המוט, שגודלו $k|q|^2/\ell^2$, משתווה לכוח המופעל על מטענים אלה על ידי השדה החשמלי, שגודלו $|q|E$ (ראה תרשים למעלה), כלומר:

$$\frac{k|q|^2}{\ell^2}=|q|E$$

$$\Rightarrow|q|=\frac{E\ell^2}{k}=\frac{(226.2)0.1^2}{9\times10^9}=2.5\times10^{-10}\,\text{C}$$

לכן, על הצד הימני של המוט מצטבר מטען חיובי $q_1=+2.5\times10^{-10}\,\text{C}$, ועל צדו השמאלי של המוט מצטבר מטען שלילי $q_2=-2.5\times10^{-10}\,\text{C}$.

ג. לפי תרשים הכוחות המתואר בסעיף ב' מתקבל שהכוח החשמלי השקול על המוט שווה לאפס. לכן המתיחות בחוט שווה אף היא לאפס.

ד. עודף המטען השלילי שעל המוט עובר אל הלוח, והמוט נעשה חיובי. כתוצאה מכך נוצרת דחייה בינו לבין הלוח.

פתרון בעיה 20/ פרק 1

א. המטענים החיוביים נעים בתאוצה מהפוטנציאל הגבוה אל הפוטנציאל הנמוך, לכן לוח 1 נמצא בפוטנציאל גבוה, ואילו לוח 2 נמצא בפוטנציאל נמוך.

ב. מחוק שימור האנרגיה נקבל:

$$U_1+E_{K1}=U_2+E_{K2}$$

$$\Rightarrow qV_1+\tfrac{1}{2}mv_1^2=qV_2+\tfrac{1}{2}mv_2^2$$

$$\Rightarrow q\left(V_1-V_2\right)=\tfrac{1}{2}mv_2^2-\tfrac{1}{2}mv_1^2$$

כאשר $V_1-V_2=V_0$.

עבור יון המימן נקבל:

$$eV_0=\tfrac{1}{2}m_{\text{H}^+}v_{\text{H}^+}^2-0 \qquad \Rightarrow v_{\text{H}^+}=\sqrt{\frac{2eV_0}{m_p}}$$

ועבור יון ההליום:

$$2eV_0=\tfrac{1}{2}m_{\text{He}^{+2}}v_{\text{He}^{+2}}^2-0$$

$$\Rightarrow v_{\text{He}^{+2}}=\sqrt{\frac{4eV_0}{m_{\text{He}^{+2}}}}=\sqrt{\frac{4eV_0}{4m_p}}=\sqrt{\frac{eV_0}{m_p}}$$

מכאן נקבל:

$$\frac{v_{He^{+2}}}{v_{H^+}}=\sqrt{\frac{eV_0}{m_p}}\sqrt{\frac{m_p}{2eV_0}}=\frac{1}{\sqrt{2}}$$

ג. נשתמש בחוק שימור האנרגיה עבור יון המימן בין הנקודות B ו- C ונקבל:

$$U_B+E_{KB}=U_C+E_{KC}$$
$$\Rightarrow q_p\left(V_B-V_C\right)=\tfrac{1}{2}m_pv_C^2-\tfrac{1}{2}m_pv_B^2$$
$$\Rightarrow eV_{BC}=0-\tfrac{1}{2}m_p\left(\sqrt{\frac{2eV_0}{m_p}}\right)^2$$
$$\Rightarrow V_{BC}=-V_0$$

ד. נשתמש בקשר: $E_2=-\dfrac{V_B-V_C}{x_B-x_C}$.

נבחר את הכיוון החיובי של ציר x בכיוון מ- B אל C ואת $x=0$ בנקודה B ונקבל:

$$E_2=-\frac{V_B-V_C}{x_B-x_C}=-\frac{-V_0}{0-\left(d/2\right)}=-\frac{2V_0}{d}$$

ה. נחשב את הפרש הפוטנציאלים בין E ל- F, על ידי שימוש בחוק שימור האנרגיה עבור יון ההליום בין שתי נקודות אלה:

$$U_E+E_{KE}=U_F+E_{KF}$$
$$q_{He^{+2}}\left(V_E-V_F\right)=\tfrac{1}{2}m_{He^{+2}}v_F^2-\tfrac{1}{2}m_{He^{+2}}v_E^2$$
$$2eV_{EF}=0-\tfrac{1}{2}4m_p\left(\sqrt{\frac{eV_0}{m_p}}\right)^2$$
$$\Rightarrow V_{EF}=-V_0$$

נבחר כי הכיוון החיובי הוא ימינה, ו- $x=0$ על לוח 2, ונקבל:

$$V_E-V_F=-E_2\left(x_E-x_F\right)$$

נציב E_2 מהסעיף הקודם ו- $V_{EF}=-V_0$ ונקבל:

$$\Rightarrow -V_0=-\left(-\frac{2V_0}{d}\right)\left(0-x_F\right)$$
$$\Rightarrow x_F=V_0\left(\frac{d}{2V_0}\right)=\frac{d}{2}$$

פתרון בעיה 21/ פרק 1

א. מהעובדה שחלקיק ה- α שמטענו חיובי נע בתאוטה, ניתן להסיק שהוא עובר מפוטנציאל נמוך אל פוטנציאל גבוה. כלומר, לוח 1 נמצא בפוטנציאל נמוך, ואילו לוח 2 נמצא בפוטנציאל גבוה.

<u>דרך אחרת:</u>

מהעובדה שחלקיק ה- α נע בתאוטה בקו ישר, ניתן להסיק שהוא נע נגד כיוון השדה החשמלי. כלומר השדה החשמלי מכוון מלוח 2 אל לוח 1.

בנוסף, ידוע כי השדה החשמלי מכוון תמיד מפוטנציאל גבוה אל הנמוך. מכאן נקבל שהלוח 2 נמצא בפוטנציאל גבוה ושהלוח 1 נמצא בפוטנציאל נמוך.

ב. נבחר כי הכיוון החיובי של ציר x הוא בכיוון תנועת חלקיק α, וש- $x=0$ על הלוח 1, ונקבל:

$$E=-\frac{V_1-V_2}{x_1-x_2}=-\frac{0-200}{0-2}=-100\,\text{V/m}$$

השדה שהתקבל שלילי, כלומר שהוא מכוון בכיוון השלילי של ציר ה- x (מהלוח 2 אל לוח 1).

ג. נשתמש בחוק שימור האנרגיה עבור חלקיק ה- α, בין נקודת הכניסה שלו שתסומן ב- A, ובין נקודת העצירה הרגעית שלו ש תסומן ב- B, ונקבל:

$$q_\alpha V_A+\tfrac{1}{2}m_\alpha v_A^2=q_\alpha V_B+\tfrac{1}{2}m_\alpha v_B^2$$
$$\Rightarrow q_\alpha\left(V_A-V_B\right)=\tfrac{1}{2}m_\alpha v_B^2-\tfrac{1}{2}m_\alpha v_A^2$$
$$\Rightarrow 2e\left(0-V_B\right)=0-\tfrac{1}{2}\left(4m_p\right)v_A^2$$
$$\Rightarrow V_B=\frac{m_pv_A^2}{e}=\frac{1.672\times10^{-27}\left(10^5\right)^2}{1.6\times10^{-19}}$$
$$\Rightarrow V_B=104.5\,\text{V}$$

ד. נשתמש בקשר:

$$V_{AB}=-E\left(x_A-x_B\right)$$
$$\left(0-104.5\right)=-\left(-100\right)\left(0-x_B\right)$$
$$\Rightarrow x_B=1.045\,\text{m}=104.5\,\text{cm}$$

ה. נשתמש בחוק שימור האנרגיה עבור חלקיק α בין שני הלוחות:

$$q_\alpha\left(V_1-V_2\right)=\tfrac{1}{2}m_\alpha v_2^2-\tfrac{1}{2}m_\alpha v_1^2$$

כאשר: $v_1=v_{\min}$, $v_2=0$, $V_1=0$ ו- $V_2=200\,\text{V}$. נציב ונקבל:

$$2e(0-200)=0-\tfrac{1}{2}(4m_p)v_{\min}^2$$

$$\Rightarrow v_{\min}=\sqrt{\frac{200e}{m_p}}=\sqrt{\frac{200(1.6\times10^{-19})}{1.672\times10^{-27}}}=$$

$$=1.38\times10^5\ \text{m/s}$$

פתרון בעיה 22/ פרק 1

א.

$$\tfrac{1}{2}m_p v_{p0}^2=\tfrac{1}{2}m_\alpha v_{\alpha0}^2=\tfrac{1}{2}(4m_p)v_{\alpha0}^2$$

$$\Rightarrow v_{p0}=2v_{\alpha0}$$

ב.

$$\frac{F_p}{F_\alpha}=\frac{q_pE}{q_\alpha E}=\frac{eE}{2eE}=\frac{1}{2}$$

ג. מתקיים:

$$a_p=\frac{q_pE}{m_p}=\frac{eE}{m_p};\qquad a_\alpha=\frac{q_\alpha E}{m_\alpha}=\frac{2eE}{m_\alpha}$$

$$\Rightarrow\frac{a_p}{a_\alpha}=\frac{eE}{m_p}\left(\frac{m_\alpha}{2eE}\right)=\frac{m_\alpha}{2m_p}=\frac{4m_p}{2m_p}=2$$

ד.

$$\Delta x_p=\frac{0^2-v_{p0}^2}{2a_p};\qquad \Delta x_\alpha=\frac{0^2-v_{\alpha0}^2}{2a_\alpha}$$

$$\Rightarrow\frac{\Delta x_p}{\Delta x_\alpha}=\frac{v_{p0}^2}{2a_p}\frac{2a_\alpha}{v_{\alpha0}^2}=\left(\frac{v_{p0}}{v_{\alpha0}}\right)^2\frac{a_\alpha}{a_p}=(2)^2\tfrac{1}{2}=2$$

ה. מתוך הקשר $v=v_0+at$, נקבל שהזמן עד לעצירה רגעית נתון על ידי: $t=-v_0/a$. מכאן:

$$\frac{t_p}{t_\alpha}=\frac{-v_{p0}/a_p}{-v_{\alpha0}/a_\alpha}=\left(\frac{v_{p0}}{v_{\alpha0}}\right)\left(\frac{a_\alpha}{a_p}\right)=2\times\tfrac{1}{2}=1$$

פתרון בעיה 23/ פרק 1

א.

$$E_1=-\frac{\Delta V}{\Delta x}=-\frac{100-0}{0-0.1}=1000\ \text{V/m}$$

$$E_2=-\frac{\Delta V}{\Delta x}=-\frac{300-0}{0.25-0.1}=-2000\ \text{V/m}$$

ב. נשתמש בחוק שימור האנרגיה עבור האלקטרון בין לוחות 1 ו-2, ונקבל:

$$\tfrac{1}{2}m_ev_1^2+q_eV_1=\tfrac{1}{2}m_ev_2^2+q_eV_2$$

$$\Rightarrow\tfrac{1}{2}m_ev_{\min}^2+(-e)(100)=0+0$$

$$\Rightarrow v_{\min}=\pm\sqrt{\frac{200e}{m_e}}=\pm\sqrt{\frac{200(1.6\times10^{-19})}{9.11\times10^{-31}}}=$$

$$=\pm5.926\times10^6\ \text{m/s}$$

נבחר במקרה זה בתוצאה החיובית.

ג. נשתמש בחוק שימור האנרגיה עבור האלקטרון בתנועתו בין הלוחות 2 ו-3:

$$\tfrac{1}{2}m_ev_2^2+q_eV_2=\tfrac{1}{2}m_ev_3^2+q_eV_3$$

$$\Rightarrow 0+0=\tfrac{1}{2}m_ev_3^2+(-e)(300)$$

$$\Rightarrow v_3=\pm\sqrt{\frac{600e}{m_e}}=\pm1.0265\times10^7\ \text{m/s}$$

גם כאן נבחר בתוצאה שסימנה חיובי.

ד. נשתמש בחוק שימור האנרגיה עבור הפרוטון במעבר בין הלוח 1 לנקודה שבה נעצר רגעית (שנסמן אותה ב-4). מתקיים:

$$E_{K1}+q_pV_1=E_{K4}+q_pV_4$$

מתקיים: $E_{K1}=E_{K2}=0$. מכאן:

$$0+q_pV_1=0+q_pV_4$$

$$\Rightarrow V_4=V_1=100\ \text{V}$$

על פי הגרף שבתרשים ב', המתחם שווה ל- $100\ \text{V}$ עבור $x=15\ \text{cm}$, כלומר הפרוטון נעצר רגעית בנקודה $x=15\ \text{cm}$, ואינו מצליח להגיע ללוח 3.

פתרון בעיה 24/ פרק 1

א. משמעות משפט זה היא שהפוטנציאל החשמלי קטן ב- $800\ \text{V}$ כאשר מתקדמים מטר אחד בכיוון השדה החשמלי האחיד, או לחלופין, שהפוטנציאל החשמלי גדל ב- $800\ \text{V}$ כאשר מתקדמים מטר אחד נגד כיוון השדה החשמלי.

ב.

(1) אפשר להתייחס אל המערכת כאל קבל. בין לוחות הקבל, השדה החשמלי מכוון מהלוח החיובי אל הלוח השלילי. מאחר שהשדה מכוון מהקרקע אל הענן, ניתן להסיק כי מטענו של הענן שלילי.

(2) מאחר ועוצמת השדה החשמלי (בין שני לוחות שהממדים שלהם גדולים ביחס למרחק

ביניהם) נתונה על ידי: $E = 4\pi k\sigma$, נקבל:

$$4\pi k\sigma = 800$$

$$\Rightarrow \sigma = 7.07\times10^{-9}\ \mathrm{C/m^2}$$

בגלל שהמטען על הענן שלילי, נרשום:

$$\sigma = -7.07\times10^{-9}\ \mathrm{C/m^2}$$

לכן:

$$Q = \sigma A = \left(-7.07\times10^{-9}\right)\left(2.2\times10^{5}\right) =$$

$$= -1.555\times10^{-3}\ \mathrm{C}$$

ג. $|\Delta V| = |E|d = 800\times400 = 320{,}000\ \mathrm{V}$.

השדה החשמלי תמיד מכוון מהפוטנציאל הגבוה אל הפוטנציאל הנמוך. לכן פני הקרקע נמצאים בפוטנציאל גבוה.

ד.

(1) משמעות העובדה שטיפה זו ממשיכה לנוע במהירות קבועה היא שהכוח החשמלי שפועל עליה הוא כלפי מעלה (נגד כיוון כוח הכובד) כלומר, הכוח החשמלי הפועל על טיפת המים מכוון בכיוון השדה החשמלי, וזה מתקיים אך ורק אם טיפת המים טעונה במטען חיובי.

(2) נבחר את הכיוון החיובי של ציר y כלפי מעלה ונשתמש בחוק הראשון של ניוטון:

$$F_e + F_g = 0$$

$$qE + (-mg) = 0$$

$$q = \frac{mg}{E} = \frac{\frac{0.1}{1000}\times10}{800} = 1.25\times10^{-6}\ \mathrm{C}$$

ה.

(1) מאחר והשדה החשמלי בין הענן והקרקע נתון על ידי: $E = 4\pi k\sigma$, ומאחר וצפיפות המטען המשטחית לא השתנתה, מקבלים שהשדה החשמלי אינו משתנה.

(2) מתקיים $|\Delta V| = E\Delta y$. מכיוון ש-Δy קטן פי שניים, גם הפרש הפוטנציאלים יקטן פי שניים.

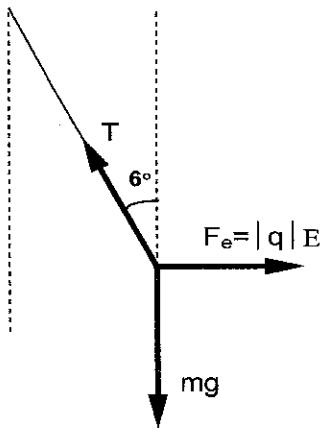
פתרון בעיה 25/ פרק 1

א. השדה מכוון מהלוח החיובי אל הלוח השלילי, כלומר מלוח 1 אל לוח 2. עוצמת השדה החשמלי היא:

$$|E| = \frac{|\Delta V|}{d} = \frac{1000\ \mathrm{V}}{0.1\mathrm{m}} = 10{,}000\ \mathrm{V/m}$$

ב. מאחר והכוח החשמלי הפועל על הכדור מכוון נגד כיוון השדה החשמלי, המטען על הכדור הוא שלילי.

ג. כדי לחשב את גודל המטען על הכדור, נרשום את הכוחות הפועלים עליו וניעזר בחוק הראשון של ניוטון. על הכדור פועלים הכוחות המתוארים בתרשים הבא:



מתקיים:

$$|q|E = T\sin 6$$

$$mg = T\cos 6$$

משתי משוואות אלה נקבל:

$$|q| = \frac{mg\tan 6}{E} = \frac{\frac{0.05}{1000}(10)\tan 6}{10{,}000}$$

$$\Rightarrow q = -5.25\times10^{-9}\ \mathrm{C}$$

ד.

(1) מאחר שהמתח בין הלוחות נשאר קבוע, השדה החשמלי בין הלוחות יקטן כי הוא נתון על ידי: $E = \Delta V / d$. כתוצאה מכך הכוח החשמלי על הכדור קטן, דבר שגורם להקטנת הזווית בין החוט לאנך.

(2) במקרה הזה המטען על הלוחות נשאר קבוע, ולכן השדה החשמלי בין הלוחות, הנתון על ידי: $E = 4\pi k\sigma$ אינו משתנה, וכתוצאה מכך הכוח החשמלי הפועל על הכדור אינו משתנה, ולכן הזווית לא תשתנה.

פתרון בעיה 26/ פרק 1

א. המטען על גוף כדורי מוליך מתפזר על פניו באופן אחיד. מתקיים:

$$\frac{kQ}{R} = 18{,}000$$

$$\Rightarrow Q = \frac{18{,}000(0.06)}{9\times10^{9}} = 1.2\times10^{-7}\ \mathrm{C}$$

ב.

(1)

$$W(A\to C)=q(V_C-V_A)=$$
$$=10^{-6}(12,000-18,000)=-6\times10^{-3}\,\text{J}$$

(2) $W(C\to D)=0$

(3) $W(E\to B)=q(V_B-V_E)=+6\times10^{-3}\,\text{J}$

ג.

$$V_E=\frac{kQ}{r_E}\quad\Rightarrow r_E=\frac{kQ}{V_E}$$
$$F_q=\frac{kQq}{r_E^2}=kQq\frac{V_E^2}{k^2Q^2}=\frac{q}{Q}\frac{V_E^2}{k}=$$
$$=\frac{10^{-6}}{1.2\times10^{-7}}\frac{9000^2}{9\times10^9}=0.075\,\text{N}$$

ד. מתקיים: $V(r)=\frac{kQ}{r}$.

מתוך הקשר: $V_0=\frac{kQ}{R}$, נקבל: $Q=\frac{RV_0}{k}$.

נציב Q במשוואה הנ"ל ונקבל:

$$V(r)=\frac{k}{r}\left(\frac{RV_0}{k}\right)=V_0\left(\frac{R}{r}\right)$$

ה.

$$V_0\left(\frac{R}{r}\right)=0.1V_0$$
$$\Rightarrow r=10R=60\,\text{cm}$$

פתרון בעיה 27/ פרק 1

א. הפרש הפוטנציאלים בין האנודה לקתודה הוא 450V, כלומר: $V_A-V_K=450\,\text{V}$. לכן נקבל:

$$V_A=450\,\text{V}+V_K$$

מאחר ש-V_K הוא גודל שלילי (כי הקתודה טעונה במטען שלילי), נקבל $V_A<450\,\text{V}$.

ב. מכיוון שפוטנציאל הקתודה הוא כעת אפס (בגלל שהיא מוארקת), נקבל ש: $V_A=450\,\text{V}$, ולכן:

$$\frac{kQ}{R}=450\quad\Rightarrow Q=\frac{450(0.03)}{9\times10^9}=1.5\times10^{-9}\,\text{C}$$

ג.

(1) נשתמש בחוק שימור האנרגיה עבור האלקטרון בתנועתו בין הקתודה והאנודה:

$$U_K+\tfrac{1}{2}m_ev_K^2=U_A+\tfrac{1}{2}m_ev_A^2$$
$$q_eV_K+\tfrac{1}{2}m_ev_K^2=q_eV_A+\tfrac{1}{2}m_ev_A^2$$
$$q_e(V_K-V_A)=\tfrac{1}{2}m_ev_A^2-\tfrac{1}{2}m_ev_K^2$$
$$(-1.6\times10^{-19})(-450)=\tfrac{1}{2}(9.11\times10^{-31})v_A^2-0$$
$$\Rightarrow v_A=1.26\times10^7\,\text{m/s}$$

ד. השדה החשמלי בתוך קליפה כדורית טעונה הוא אפס. לכן לא פועל על האלקטרונים כוח חשמלי במהלך תנועתם בתוך הקליפה, ולכן לפי החוק הראשון של ניוטון מהירותם לא תשתנה, והם יוצאים מצדה השני של הקליפה באותה מהירות בה נכנסו אליה בנקודה A.

<u>דרך אחרת:</u> על פי חוק שימור האנרגיה נקבל:

$$U_B+E_{KB}=U_A+E_{KA}$$

מאחר שמתקיים: $U_B=U_A=\frac{kq_eQ}{R}$, נקבל: $E_{KB}=E_{KA}$, לכן נקבל $v_B=v_A$.

ה.

(1) הפרש הפוטנציאלים בין האנודה לקתודה אינו משתנה, כי הוא תלוי רק במקור המתח, שהוא קבוע.

(2) השדה החשמלי הממוצע בין הקתודה לאנודה משתנה כי $\left(\bar{E}=-\Delta V/\Delta x\right)$.

(3) מאחר ומהירות הגעת האלקטרונים אל האנודה תלויה בהפרש הפוטנציאלים בין האנודה והקתודה, ומאחר שגודל זה לא השתנה, נקבל שמהירות הגעת האלקטרונים אל האנודה לא תשתנה.

פתרון בעיה 28/ פרק 1

א. השדה אינו אחיד כי כיוונם של קווי השדה החשמלי אינו קבוע, וגם צפיפותם אינה אחידה.

ב. כאשר מתקדמים בכיוון קווי השדה, הפוטנציאל קטן. לכן מתקיים: $V_1>V_2>V_3$.

ג. כאשר מעבירים מטען q בין שתי נקודות 1 ו-2, הנמצאות על משטח שווה פוטנציאל, לאורך מסלול כלשהוא הנמצא על המשטח, העבודה המתבצעת על ידי השדה החשמלי

והנתונה על ידי: $W_{F_e}=q(V_1-V_2)$, היא אפס, וזה בגלל שמתקיים: $V_1=V_2$. כלומר:

$$W_{F_e}(1\to 2)=0$$

מצד שני מתקיים שעבודת השדה החשמלי לאורך המסלול נתונה על ידי:

$$W_{F_e}=\sum_{i=1}^{\infty}\left(F_{\|i}\right)\Delta x_i=\sum_{i=1}^{\infty}\left(qE_{\|i}\right)\Delta x_i,$$

כאשר חילקנו את המסלול למספר אינסופי של אלמנטים. $E_{\|i}$ הוא רכיב השדה החשמלי המקביל לאלמנט i במסלול התנועה. מאחר שעבודה זו היא אפס (ראה הסבר למעלה), נקבל שצריך להתקיים:

$$\sum_{i=1}^{\infty}\left(qE_{\|i}\right)\Delta x_i=0$$

וזה מתקיים אך ורק אם בכל האלמנטים של המסלול מתקיים $E_{\|i}=0$. כלומר, בכל האלמנטים של המסלול אין לשדה החשמלי רכיב המקביל למסלול. מכאן שהשדה החשמלי ניצב למשטח שווה הפוטנציאל בכל נקודותיו.

ד.

(1)

$$W(A\to B)=U_B-U_A=q(V_B-V_A)=0$$

(2)

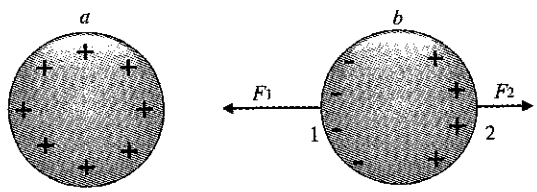
$$W(A\to C)=q(V_C-V_A)=$$
$$=\left(-6\times10^{-3}\right)(500-800)=1.8\,\text{J}$$

ה.

$$W(E\to D)=q(V_D-V_E)=$$
$$1.8\times10^{-6}=6\times10^{-9}(500-V_E)$$
$$\Rightarrow V_E=200\,\text{V}$$

פתרון בעיה 29/ פרק 1

א. משיכה זו נוצרת כתוצאה מהקיטוב הנוצר בכדור הניטרלי, כפי שמתואר בתרשים הבא:



כתוצאה מהקיטוב פועלים על הכדור הניטרלי שני כוחות חשמליים: F_1 כוח משיכה ו-F_2 שהוא כוח דחייה. מאחר שהמטענים המושרים שווים בגודלם ומנוגדים בסימנם, ומאחר שהכוח החשמלי קטן עם המרחק, נקבל ש: $F_1>F_2$. לכן, הכוח השקול הפועל על הכדור הניטרלי הוא לכיוון הכדור הטעון, ובכך נוצרת משיכה חשמלית בין שני הכדורים.

ב. מאחר ששני הכדורים זהים בממדים שלהם, המטען מתחלק ביניהם באופן שווה, כך שהמטען על כל כדור יהיה $2\mu\text{C}$.

בתהליך זה עברו אלקטרונים מן הכדור הניטרלי אל הכדור החיובי. כתוצאה מכך הכדור הניטרלי נטען במטען חיובי שגודלו $+2\mu\text{C}$, והמטען על הכדור החיובי קטן באותה מידה ונעשה:

$$4\mu\text{C}+(-2\mu\text{C})=2\mu\text{C}$$

מספר האלקטרונים שעברו שווה ל:

$$N_e=\frac{-2\mu\text{C}}{-1.6\times10^{-19}\,\text{C}}=1.25\times10^{13}$$

ג. נסמן את המטען על הכדור הראשון לאחר חיבור שני הכדורים ב-q_1' ואת המטען על הכדור השני ב-q_2'. משימור המטען נקבל:

$$(1)\quad q_1'+q_2'=2\mu\text{C}$$

ומשוויון הפוטנציאל על שני הכדורים בסוף התהליך נקבל:

$$\frac{kq_1'}{R_1}=\frac{kq_2'}{R_2}\qquad q_2'=q_1'\frac{R_2}{R_1}=1.5q_1'$$

נציב את q_2' מהמשוואה האחרונה במשוואה (1) ונקבל:

$$q_1'+1.5q_1'=2\mu\text{C}$$
$$\Rightarrow q_1'=0.8\mu\text{C}\qquad\Rightarrow q_2'=1.2\mu\text{C}$$

ד. גם במקרה זה נוצרת משיכה בין הכדור הניטרלי המבדד לבין הכדור הטעון, כי גם בכדור הניטרלי נוצר קיטוב – אמנם ברמת המולוקלות, ולא ברמת הגוף כולו. קיטוב זה שנוצר בכל מולקולה גורם להופעת כוח שקול שפועל על המולקולה וגורם למשיכה שלה לכדור הטעון. סך כל כוחות המשיכה הפועלים על כל מולקולות החומר המבדד יוצר כוח שקול שפועל על הכדור הניטרלי לכיוון הכדור

הטעון. כתוצאה מכוח זה ומכוח התגובה שלו שפועל על הכדור הטעון, נוצרת משיכה בין שני הכדורים.

פתרון בעיה 30/ פרק 1

א. בגלל שהגוף מוליך, עודף המטען מתפזר על פני הגוף בלבד, ובמיוחד בקצוות הבולטים שלו. בתוך הגוף אין עודף מטען.

ב. תהליך הטעינה של הגוף נמשך עד שהפוטנציאל בנקודה A מגיע ל-$1000\,\text{V}$, בשלב זה נפסק תהליך הטעינה. מאחר והגוף מוליך צריך להתקיים שהפרש הפוטנציאלים בין כל שתי נקודות על פניו הוא אפס (כלומר פני המוליך הם משטח שווה פוטנציאל), שהרי אם היה הפרש פוטנציאלים בין הנקודות על פני המוליך היינו מקבלים תנועת מטענים בניהן (כלומר זרם חשמלי). מאחר ואין תנועת מטענים על פני הגוף נקבל שהפוטנציאל בכל הנקודות על פניו זהה ושווה ל-$1000\,\text{V}$.

ג. מאחר שהגוף נטען במטען חיובי, ניתן להסיק שיצאו ממנו אלקטרונים. מספר האלקטרונים שיצאו מהגוף שווה לעודף הפרוטונים עליו, שהוא:

$$N=\frac{1\mu\text{C}}{e}=\frac{10^{-6}\,\text{C}}{1.6\times10^{-19}\,\text{C}}=6.25\times10^{12}$$

ד. השדה החשמלי בתוך גוף מוליך הוא תמיד אפס. אפשר להראות זאת בשתי גישות, הראשונה דרך השלילה. אם מניחים שהשדה החשמלי בתוך המוליך שונה מאפס, נקבל תנועה של אלקטרונים חופשיים נגד כיוון השדה, כלומר נקבל זרם. מאחר שהזרם במוליך הוא אפס נסיק שהשדה החשמלי חייב להיות אפס.

הגישה השנייה מסתמכת על חוק גאוס. על פיו, השטף החשמלי ϕ_e דרך משטח סגור כלשהו שווה ל-$(4\pi kq_i)$ כאשר q_i הוא המטען הכלוא ב-"משטח הגאוסי". אם נבחר משטח גאוס סגור כלשהו בתוך המוליך, נקבל שהשטף של השדה החשמלי דרך משטח זה הוא אפס, כי $q_i=0$ וזה בגלל שעודף המטען על גוף מוליך מצטבר רק על פני השטח החיצוני שלו. מהתוצאה שהשטף החשמלי דרך כל משטח גאוס בתוך הגוף הוא אפס נקבל שהשדה החשמלי בתוך הגוף הוא אפס.

ה. הפוטנציאל בכל הנקודות בתוך גוף מוליך קבוע ושווה לערכו על פני הגוף, כלומר $1000\,\text{V}$. שהרי אם הפוטנציאל לא היה אחיד, היה נוצר הפרש פוטנציאלים בין החלקים השונים בגוף, ומאחר שהגוף מוליך הייתה נוצרת בו תנועת מטענים (אלקטרונים חופשיים שהיו נעים מהפוטנציאל הנמוך אל הפוטנציאל הגבוה), אולם דבר זה בלתי אפשרי ללא מקור מתח, לכן הפרש הפוטנציאלים בין כל הנקודות בתוך הגוף המוליך ועל פניו חייב להתאפס. כלומר, הפוטנציאל בכל הנקודות בתוך הגוף ועל פניו הוא קבוע ושווה ל-$1000\,\text{V}$.

<u>**גישה נוספת:**</u>

העבודה שמבצע השדה החשמלי כאשר מעבירים מטען q' מנקודה 1 על פני הגוף לנקודה 2 בתוך הגוף היא אפס, וזה בגלל שהשדה בתוך הגוף הוא אפס. מצד שני עבודת השדה החשמלי נתונה על ידי: $W(1\to2)=q'(V_1-V_2)$. בגלל שעבודה זו היא אפס נקבל ש-$V_2=V_1=1000\,\text{V}$, כלומר הפוטנציאל החשמלי בכל הנקודות בתוך הגוף שווה לערכו על פני הגוף ($1000\,\text{V}$ במקרה זה).

ו. אם מעבירים מטען q בין שתי נקודות 1 ו-2 לאורך מסלול מסוים על פני הגוף, אזי עבודת השדה החשמלי המתבצעת בתהליך זה נתונה על ידי: $W_{F_e}=q(V_1-V_2)$. מאחר שעל פני הגוף מתקיים: $V_1=V_2$, נקבל כי $W_{F_e}=0$.

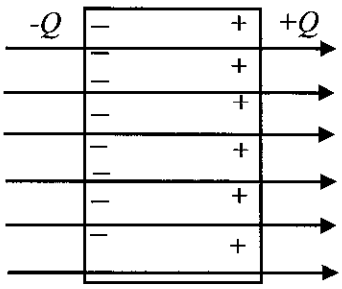
מצד שני, מתקיים שעבודת הכוח החשמלי לאורך המסלול נתונה על ידי: $W_{F_e}=\sum_{i=1}^{\infty}(qE_{\|i})\Delta x_i$. מאחר שעבודה זו היא אפס, נקבל שהסכום האחרון הוא אפס. דבר זה מתקיים אך ורק אם $E_{\|i}=0$. כלומר, לאורך כל האלמנטים של המסלול אין לשדה החשמלי רכיב המקביל למסלול. לכן, לאורך כל נקודות המסלול יש לשדה החשמלי רכיב אחד והוא הניצב למסלול.

מסקנה: השדה החשמלי בכל הנקודות על פני גוף מוליך טעון ניצב לפני הגוף.

פתרון בעיה 31/ פרק 1

א. בתיבה המוליכה נוצר קיטוב של המטען וזאת כתוצאה מפעולת השדה החשמלי החיצוני. אלקטרונים חופשיים נעים נגד כיוון השדה החשמלי ומצטברים על הדופן 1, ומשאירים מאחוריהם מספר זהה של פרוטונים בצד האחר של התיבה (הדופן 2).

במלים אחרות, בהשפעת השדה החשמלי, מצטבר מטען חיובי $+Q$ על הדופן 2 ומטען שלילי $-Q$ על הדופן 1 כפי שמתואר בתרשים הבא:



ב. תהליך הקיטוב של המטען נמשך עד לרגע שבו הכוח החשמלי השקול על המטענים בתוך המוליך מתאפס. כלומר, עד שהשדה החשמלי הנוצר על ידי המטענים המושרים יהיה שווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לשדה החיצוני E_0. משמע, השדה החשמלי השקול בתוך המוליך שווה לאפס.

ג. כאמור, הקיטוב נמשך עד שהשדה החשמלי הנוצר על ידי המטענים המושרים יהיה שווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לשדה החשמלי החיצוני E_0. כלומר, נוצרות צפיפויות מטען משטחיות $+\sigma$ על הלוח 2 ו-$-\sigma$ על הלוח 1 כך שמתקיים:

$$4\pi k|\sigma| = 400$$

$$\Rightarrow |\sigma| = 3.53\times10^{-9}\ \mathrm{C/m^2} = 3.53\ \mathrm{nC/m^2}$$

$$\Rightarrow \sigma_2 = 3.53\ \mathrm{nC/m^2},\quad \sigma_1 = -3.53\ \mathrm{nC/m^2}$$

ד. אם התיבה עשויה מחומר מבדד, לא נוצר קיטוב מלא, אלא קיטוב ברמה מיקרוסקופית במולקולות של החומר. דבר שגורם להקטנת השדה החשמלי E_0 בתוך החומר אך לא לביטולו. גודל השדה החשמלי בתוך החומר יהיה:

$$E_r = \frac{E_0}{\varepsilon_r} = \frac{400}{4} = 100\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

פתרון בעיה 32/ פרק 1

א. מאחר שבתהליך הטעינה המטענים עוברים מכדור אחד לשני, נקבל שכמות המטען על הכדור הראשון שווה בגודלה לכמות המטען על הכדור השני, אך הפוכה לה בסימנה. המטען על הכדור 1 חיובי ועל הכדור 2 שלילי.

ב. נסמן את המטען על כדור 1 ב-q, ואת המטען על כדור 2 ב-$-q$. לכן נקבל:

$$V_1 = \frac{kq_1}{R_1} = \frac{kq}{R_1}$$

$$V_2 = \frac{kq_2}{R_2} = \frac{k(-q)}{R_2}$$

$$\Rightarrow V_1 - V_2 = \frac{kq}{R_1} - \frac{k(-q)}{R_2} = 2700$$

$$\Rightarrow kq\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = 2700$$

$$\Rightarrow 9\times10^9 q\left(\frac{1}{0.04} + \frac{1}{0.02}\right) = 2700$$

$$\Rightarrow q_1 = 4\times10^{-9}\ \mathrm{C} = 4\ \mathrm{nC}$$

$$\Rightarrow q_2 = -4\times10^{-9}\ \mathrm{C} = -4\ \mathrm{nC}$$

ג. מקור המתח מעביר מטען $q_1 = 4\ \mathrm{nC}$ בין שני קטביו (כלומר בין שתי נקודות שהפרש הפוטנציאלים ביניהן הוא $2{,}700\ \mathrm{V}$). לכן העבודה שהוא מבצע:

$$W_\varepsilon = \Delta Q \Delta V = 4\times10^{-9}\times2700 = 1.08\times10^{-5}\ \mathrm{J}$$

ד. אם מאריקים את כדור 1, הפוטנציאל עליו יתאפס, ולכן גם המטען עליו יתאפס. הפוטנציאל על הכדור השני יהיה כעת $-2700\ \mathrm{V}$, לכן המטען q_2 על כדור 2 מקיים:

$$\frac{kq_2}{R_2} = -2700$$

$$\Rightarrow q_2 = \frac{-2700(0.02)}{9\times10^9} =$$

$$= -6\times10^{-9}\ \mathrm{C} = -6\ \mathrm{nC}$$

ה. מקור המתח מעביר בתהליך זה אלקטרונים מכדור 1 אל כדור 2 עד שכמות המטען על כדור 2 תהייה $-6\ \mathrm{nC}$. מספר האלקטרונים שעברו הוא:

$$N_e = \frac{-6\times10^{-9}\ \mathrm{C}}{-1.6\times10^{-19}} = 3.75\times10^{10}\ \mathrm{elec}$$

פתרון בעיה 33/ פרק 1

א. מאחר שבתהליך הטעינה המטענים עוברים מכדור אחד לשני, ומכיוון ששני הכדורים היו ניטרליים, נקבל ש: $q_1=-q_2$, כאשר הכדור המחובר לקוטב השלילי של מקור המתח הוא שלילי והכדור המחובר לקוטב החיובי של מקור המתח הוא חיובי. לכן q_1 הוא שלילי, ו- q_2 חיובי.

ב. מתקיים: $V_2-V_1=1980\,\text{V}$, כאשר V_1 הוא הפוטנציאל שעל פני כדור 1 ו- V_2 הוא הפוטנציאל שעל פני כדור 2.

אם נסמן את המטען החיובי שעל כדור 2 ב- q אז המטען על כדור 1 יהיה $-q$. מתקיים:

$$V_1=\frac{kq_1}{R_1}+\frac{kq_2}{x}=\frac{k(-q)}{0.1}+\frac{k(+q)}{0.5}=-8kq$$

$$V_2=\frac{kq_2}{R_2}+\frac{kq_1}{x}=\frac{k(+q)}{0.2}+\frac{k(-q)}{0.5}=3kq$$

נציב V_1 ו- V_2 בקשר $V_2-V_1=1980\,\text{V}$ ונקבל:

$$3kq-(-8kq)=1980\,\text{V}$$

$$\Rightarrow q=2\times10^{-8}\,\text{C}$$

$$\Rightarrow q_2=+2\times10^{-8}\,\text{C}$$

$$\Rightarrow q_1=-2\times10^{-8}\,\text{C}$$

ג. האלקטרונים עברו מכדור 2 אל כדור 1. בתהליך זה עבר מטען שלילי שגודלו $-2\times10^{-8}\,\text{C}$ מכדור 2 לכדור 1, לכן מספר האלקטרונים שעברו הוא:

$$N_e=\frac{-2\times10^{-8}}{-1.6\times10^{-19}}=12.5\times10^{10}$$

ד. בתהליך הטעינה מקור המתח העביר מטען שגודלו $2\times10^{-8}\,\text{C}$ בין קטביו (בין שתי נקודות שהפרש הפוטנציאלים ביניהן שווה ל- $1980\,\text{V}$). לכן הוא השקיע עבודה ששווה ל:

$$W_\varepsilon=q\Delta V=2\times10^{-8}(1980)=3.96\times10^{-5}\,\text{J}$$

פתרון בעיה 34/ פרק 1

א. נשתמש בקשר: $V_1=kq_1/R_1$ ונקבל:

$$q_1=\frac{V_1R_1}{k}=\frac{900\times0.2}{9\times10^9}=2\times10^{-8}\,\text{C}=20\,\text{nC}$$

ב. לאחר החיבור, המטען על כדור 1 יהיה:

$$q_1'=\frac{V_1'R_1}{k}=\frac{225\times0.2}{9\times10^9}=5\times10^{-9}\,\text{C}=5\,\text{nC}$$

לכן השינוי במטען על כדור 1, הוא:

$$\Delta q_1=q_1'-q_1=5\,\text{nC}-20\,\text{nC}=-15\,\text{nC}$$

ועל כדור 2 הוא:

$$\Delta q_2=-\Delta q_1=+15\,\text{nC}$$

וזהו המטען שעבר מכדור 1 אל כדור 2.

ג. בחיבור בין שני הכדורים, המטען החיובי על כדור 1 קטן. משמע, שעבר אליו מטען שלילי. מכאן האלקטרונים עברו מכדור 2 אל כדור 1 ומספרם הוא:

$$N_e=\frac{\Delta q_1}{q_e}=\frac{-15\,\text{nC}}{-1.6\times10^{-19}\,\text{C}}=9.375\times10^{10}$$

ד. לאחר החיבור, הפוטנציאל על כדור 2 שווה לפוטנציאל על כדור 1, כלומר $225\,\text{V}$. לכן, המטען q_2' על הכדור השני הוא:

$$q_2'=\frac{V_2'R_2}{k}=\frac{225\times0.05}{9\times10^9}=$$

$$=1.25\times10^{-9}\,\text{C}=1.25\,\text{nC}$$

מטען זה קטן מהמטען Δq שעבר אל כדור 2 מכדור 1. מכאן, כדור 2 היה טעון לפני חיבורו לכדור 1. אם נסמן את המטען שהיה על כדור 2 לפני החיבור בין שני הכדורים ב- q_2, נקבל:

$$q_2+\Delta q_2=q_2'$$

$$\Rightarrow q_2+15\,\text{nC}=1.25\,\text{nC}$$

$$\Rightarrow q_2=-13.75\,\text{nC}$$

פתרון בעיה 35/ פרק 1

א. בנקודת האמצע בין שני המטענים $(x=2a)$.

ב. החרוז נע בתאוצה משתנה, מהנקודה A לעבר הנקודה B. בנקודה B החרוז מגיע למהירות מקסימלית. כאשר החרוז עובר את הנקודה B הוא מתחיל להאט, עד שהוא נעצר רגעית בנקודה C משמאל ל- B, ומשם הוא נע בתאוצה לעבר B, ומ- B ממשיך החרוז בתאוטה לעבר A עד לעצירה רגעית ב- A. התנועה חוזרת על עצמה באופן מחזורי בין הנקודות A ו- C.

ג. על פי הסעיף הקודם, המהירות המקסימלית

היא בנקודה B. על מנת לחשב מהירות זו ניעזר בחוק שימור האנרגיה בין הנקודות A ו-B:

$$U_1+E_{K1}=U_2+E_{K2}$$

$$\left(\frac{kq^2}{a}+\frac{kq^2}{3a}\right)+0=\left(\frac{kq^2}{2a}+\frac{kq^2}{2a}\right)+\tfrac{1}{2}mv_{\max}^2$$

$$\frac{4kq^2}{3a}=\frac{kq^2}{a}+\tfrac{1}{2}mv_{\max}^2$$

$$\tfrac{1}{2}mv_{\max}^2=\frac{kq^2}{3a}$$

$$\Rightarrow v_{\max}=\pm q\sqrt{\frac{2k}{3ma}}$$

ד. נסמן ב-x את מרחק הנקודה C מהחרוז הנמצא בנקודה $x=0$, ונשתמש בחוק שימור האנרגיה לגבי הנקודות A ו-C:

$$U_1+E_{K1}=U_2+E_{K2}$$

$$\left(\frac{kq^2}{a}+\frac{kq^2}{3a}\right)+0=\left(\frac{kq^2}{x}+\frac{kq^2}{4a-x}\right)+0$$

$$\frac{4kq^2}{3a}=\frac{kq^2(4a-x+x)}{x(4a-x)}$$

$$\Rightarrow 4x(4a-x)=12a^2$$

$$\Rightarrow 16ax-4x^2=12a^2$$

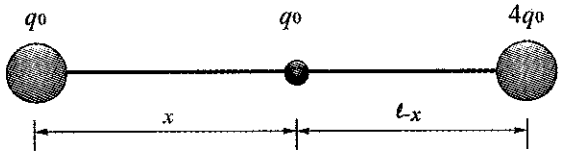
$$\Rightarrow x^2-4ax+3a^2=0$$

$$\Rightarrow (x-a)(x-3a)=0$$

נקבל שני פתרונות $x_1=3a$ ו-$x_2=a$. הפתרון $x_2=a$ שייך לנקודה C.

פתרון בעיה 36/ פרק 1

א. בנקודה זו הכוח החשמלי השקול על החרוז הוא אפס. אם נסמן מרחק נקודה זו מ-$x=0$ ב-x, כפי שמתואר בתרשים הבא, נקבל:



$$\frac{k(q_0)(q_0)}{x^2}=\frac{k(q_0)(4q_0)}{(\ell-x)^2}$$

$$\Rightarrow \frac{(\ell-x)^2}{x^2}=4$$

$$\Rightarrow \frac{\ell-x_1}{x_1}=+2,\qquad \frac{\ell-x_2}{x_2}=-2$$

$$\Rightarrow x_1=\ell/3,\qquad \Rightarrow x_2=-\ell$$

נבחר את הנקודה $x_1=\ell/3$. בנקודה $x_2=-\ell$, שני הכוחות שווים בגודלם, אך הם מכוונים לאותו כיוון, לכן אינם מבטלים זה את זה.

ב. $V_B=\frac{kq_0}{\ell/3}+\frac{k(4q_0)}{2\ell/3}=\frac{9kq_0}{\ell}$.

ג. החרוז נע בתאוצה משתנה, מהנקודה A לעבר נקודת שווי המשקל B. עד לנקודה B כיוון הכוח השקול הפועל על החרוז הוא בכיוון המהירות. אחרי הנקודה B הכוח השקול הפועל על החרוז מכוון נגד כיוון המהירות. לכן החרוז מתחיל להאט. מכאן שהמהירות המקסימלית של החרוז מתקבלת בנקודה B. כאמור, כאשר החרוז עובר את הנקודה B הוא מתחיל להאט, עד שהוא נעצר רגעית בנקודה שנסמן ב-C, משמאל ל-B, משם הוא נע בתאוצה לעבר B, ומ-B הוא נע בתאוטה לעבר A עד עצירתו הרגעית ב-A. התנועה חוזרת על עצמה מחדש באופן מחזורי.

ד. נשתמש בחוק שימור האנרגיה עבור החרוז בתנועתו בין שתי הנקודות A ו-B:

$$U_B+E_{KB}=U_A+E_{KA}$$

$$\Rightarrow\left[\frac{kq_0q_0}{\ell/3}+\frac{kq_0(4q_0)}{2\ell/3}\right]+\tfrac{1}{2}mv_{\max}^2=$$

$$+\left[\frac{kq_0q_0}{\ell/2}+\frac{kq_0(4q_0)}{\ell/2}\right]+0$$

$$\Rightarrow \tfrac{1}{2}mv_{\max}^2=\frac{10kq_0^2}{\ell}-\frac{9kq_0^2}{\ell}=\frac{kq_0^2}{\ell}$$

$$\Rightarrow v_{\max}=\pm q_0\sqrt{\frac{2k}{m\ell}}$$

ה. נשתמש בחוק שימור האנרגיה בין שתי הנקודות A ו-C, כאשר C היא נקודת העצירה הרגעית. נסמן מיקום הנקודה C ב-x ונקבל:

$$U_C+\cancel{E_{KC}}=U_A+\cancel{E_{KA}}$$

$$\Rightarrow\frac{kq_0q_0}{x}+\frac{kq_0(4q_0)}{(\ell-x)}=\frac{kq_0q_0}{\ell/2}+\frac{kq_0(4q_0)}{\ell/2}$$

$$\Rightarrow \frac{kq_0^2}{x}+\frac{4kq_0^2}{(\ell-x)}=\frac{10kq_0^2}{\ell}$$
$$\Rightarrow \ell(\ell-x)+4x\ell=10x(\ell-x)$$
$$\ell^2-\ell x+4\ell x=10\ell x-10x^2$$
$$10x^2-7\ell x+\ell^2=0$$
$$\Rightarrow x_{1,2}=\frac{7\ell\pm\sqrt{49\ell^2-40\ell^2}}{20}$$
$$\Rightarrow x_1=0.5\ell,\quad x_2=0.2\ell$$

לכן החרוז נעצר בנקודה C, הנמצאת במרחק $x=0.2\ell$ מ-$x=0$. החרוז נע בתנועה מחזורית בין שתי הנקודות: $x=0.5\ell$ ו-$x=0.2\ell$.

פתרון בעיה 37/ פרק 1

א. על פי החוק הראשון של ניוטון נקבל בנקודת שווי המשקל:

$$\frac{kq^2}{y_0^2}=mg \quad \Rightarrow y_0=q\sqrt{\frac{k}{mg}}$$

ב. על החרוז התחתון פועלים הכוחות הבאים: כוח הכובד mg כלפי מטה, הכוח החשמלי שמופעל עליו על ידי החרוז העליון כלפי מטה שהוא kq^2/y_0^2, והכוח הנורמלי N שכיוונו כלפי מעלה, כך שמתקיים: $N=mg+\frac{kq^2}{y_0^2}$.

מאחר שמתקיים גם: $\frac{kq^2}{y_0^2}=mg$ (ראה סעיף א'), נקבל:

$$N=mg+\frac{kq^2}{y_0^2}=mg+mg=2mg$$

ג. על פי חוק שימור האנרגיה, מתקיים:

$$\left(U_{mg,1}+U_{e,1}\right)+E_{K1}=\left(U_{mg,2}+U_{e,2}\right)+E_{K2}$$

כאשר U_{mg} היא האנרגיה הפוטנציאלית הגרביטציונית, ו-U_e היא האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית. נבחר את מישור הייחוס לאנרגיה הפוטנציאלית הגרביטציונית במרכז החרוז התחתון ונקבל:

$$mg(2y_0)+\frac{kq^2}{2y_0}+0=mgy'+\frac{kq^2}{y'}$$

כאשר y' הוא המרחק המינימלי בין מרכזי שני החרוזים.

מאחר וקיבלנו בסעיף א' ש: $kq^2=mgy_0^2$, נקבל:

$$mg(2y_0)+\frac{mgy_0^2}{2y_0}+0=mgy'+\frac{mgy_0^2}{y'}$$
$$2.5y_0=y'+\frac{y_0^2}{y'}$$
$$2.5y_0y'=y'^2+y_0^2$$
$$2y'^2-5y_0y'+2y_0^2=0$$
$$(2y'-y_0)(y'-2y_0)=0$$

לכן: $y_1'=2y_0$ או $y_2'=0.5y_0$. המרחק המינימלי הוא $0.5y_0$

ד. המהירות המקסימלית של החרוז מתקבלת בנקודת שווי המשקל, כי מעל לנקודה זו כוח הכובד שפועל על החרוז כלפי מטה גדול יותר מהכוח החשמלי שפועל עליו כלפי מעלה, ולכן החרוז נע בתאוצה בקטע זה של המסלול. אחרי נקודה זו כוח הכובד נעשה קטן יותר מהכוח החשמלי, והחרוז נע בתאוטה.

ה. מחוק שימור האנרגיה נקבל:

$$mg(2y_0)+\frac{kq^2}{2y_0}+0=mgy_0+\frac{kq^2}{y_0}+\tfrac{1}{2}mv_{\max}^2$$
$$mg(2y_0)+\frac{mgy_0^2}{2y_0}=mgy_0+\frac{mgy_0^2}{y_0}+\tfrac{1}{2}mv_{\max}^2$$
$$2.5gy_0=2gy_0+\tfrac{1}{2}v_{\max}^2$$
$$\Rightarrow v_{\max}=\pm\sqrt{gy_0}$$

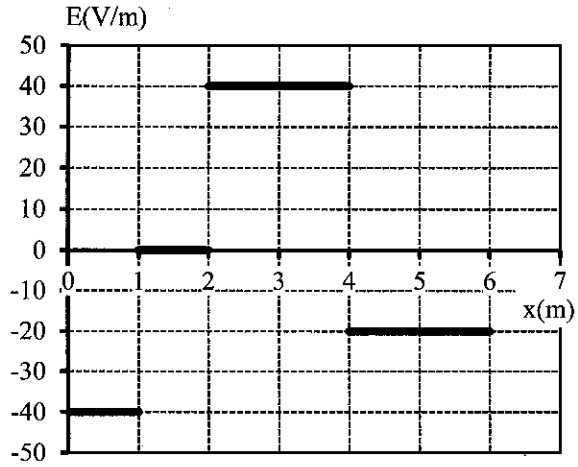
פתרון בעיה 38/ פרק 1

א. הפוטנציאל החשמלי בנקודה מסוימת הוא גודל פיזיקלי המבטא את האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית ליחידת מטען בנקודה זו. יחידת הפוטנציאל החשמלי היא J/C. יחידה זו נקראת "וולט" ומסומנת ב-V.

ב. השדה החשמלי נתון על ידי הקשר: $E=-\Delta V/\Delta x$. לכן נקבל:

$$E=\begin{cases}-40 & 0\le x<1\text{m}\\ 0 & 1\le x\le 2\text{m}\\ 40 & 2<x\le 4\text{m}\\ -20 & 4<x\le 6\text{m}\end{cases}$$

גרף המדרגות הבא המתאר את השדה החשמלי כפונקציה של המיקום:



ג.

(1) האלקטרון נע מפוטנציאל נמוך אל פוטנציאל גבוה, לכן אם נשחרר אלקטרון בנקודה $x=3\text{m}$ הוא ינוע בכיוון השלילי של הציר.

(2) האלקטרון מגיע למהירות מקסימלית ב- $x=2\text{m}$, ומשם ממשיך במהירות קבועה עד לנקודה $x=1\text{m}$, מכיוון שהפוטנציאל בתחום זה קבוע.

(3) נשתמש בחוק שימור האנרגיה בין $x=3\text{m}$ ו- $x=2\text{m}$:

$$U_1+\tfrac{1}{2}m_ev_1^2=U_2+\tfrac{1}{2}m_ev_2^2$$
$$\Rightarrow q_eV_1+\tfrac{1}{2}m_ev_1^2=q_eV_2+\tfrac{1}{2}m_ev_2^2$$
$$\Rightarrow q_e\left(V_1-V_2\right)=\tfrac{1}{2}m_ev_2^2-\tfrac{1}{2}m_ev_1^2$$
$$(-e)\left[0-40\right]=\tfrac{1}{2}m_ev_{\max}^2-0$$
$$v_{\max}=\pm\sqrt{\frac{80e}{m_e}}=\pm\sqrt{\frac{80\left(1.6\times10^{-19}\right)}{9.11\times10^{-31}}}=$$
$$=\pm3.75\times10^6\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

נבחר בסימן השלילי כי האלקטרון נע בכיוון השלילי.

ד. כדי שהאלקטרון יוכל להגיע לנקודה $x=2\text{m}$, דַי בכך שיגיע לנקודה $x=4\text{m}$ במהירות אפס, כי משם הוא ממשיך בתאוצה לעבר הנקודה $x=2\text{m}$. לכן נקבל:

$$q_e\left(V_1-V_2\right)=\tfrac{1}{2}m_ev_2^2-\tfrac{1}{2}m_ev_2^2$$
$$\Rightarrow(-e)\left[0-(-40)\right]=0-\tfrac{1}{2}m_ev_{\min}^2$$
$$\Rightarrow v_{\min}=\pm\sqrt{\frac{80e}{m_e}}=\pm\sqrt{\frac{80\left(1.6\times10^{-19}\right)}{9.11\times10^{-31}}}=$$
$$=\pm3.75\times10^6\ \text{m/s}$$

בוחרים בסימן השלילי.

ה. נשתמש בחוק שימור האנרגיה בעבור האלקטרון בין $x=4\text{m}$ ו- $x=2\text{m}$:

$$q_e\left(V_1-V_2\right)=\tfrac{1}{2}m_ev_2^2-\tfrac{1}{2}m_ev_2^2$$
$$\Rightarrow(-e)\left[(-40)-(40)\right]=\tfrac{1}{2}m_ev_2^2-0$$
$$\Rightarrow v_2=\pm\sqrt{\frac{160e}{m_e}}=\pm\sqrt{\frac{160\left(1.6\times10^{-19}\right)}{9.11\times10^{-31}}}=$$
$$=\pm5.3\times10^6\ \text{m/s}$$

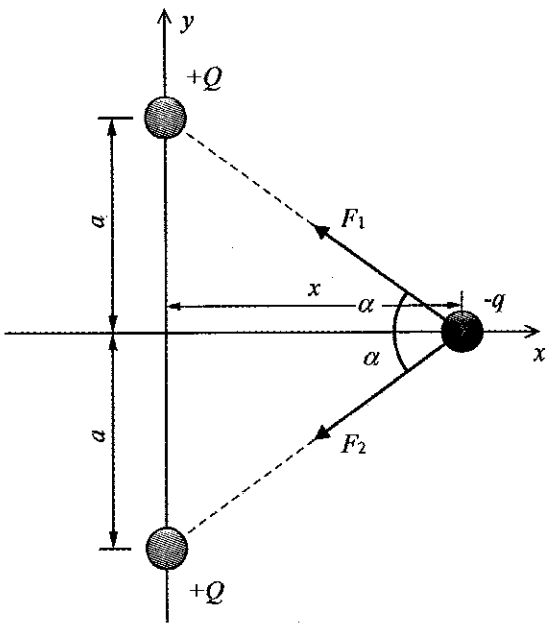
גם כאן נבחר בסימן השלילי.

ו.

$$\Delta U=U_2-U_1=q_e\left(V_2-V_1\right)=$$
$$=-e(40-0)\,\text{V}=-40\,\text{eV}=$$
$$=-40\left(1.6\times10^{-19}\right)=-6.4\times10^{-18}\ \text{J}$$

פתרון בעיה 39/ פרק 1

א.



ב. מתקיים:

$$F_1=F_2=\frac{k|-q||Q|}{r^2}=\frac{kqQ}{a^2+x^2}$$

הכוח השקול של שני כוחות אלה מכוון בכיוון השלילי של ציר x, כך שמתקיים:

$$\Sigma F_y = 0$$

$$\Sigma F_x = -2F_1\cos\alpha =$$

$$= -2\left(\frac{kqQ}{a^2+x^2}\right)\frac{x}{\sqrt{a^2+x^2}} = \frac{-2kqQx}{\left(a^2+x^2\right)^{3/2}}$$

מכאן נקבל:

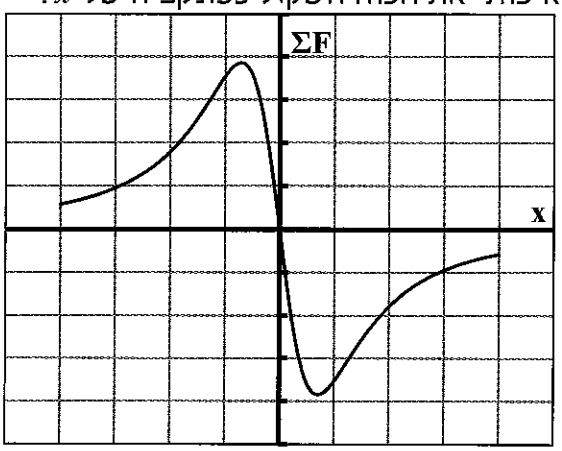
$$\Sigma F(x) = \frac{-2kqQx}{\left(a^2+x^2\right)^{3/2}}$$

ג. מתקיים:

$$\Sigma F(x=0) = 0$$

$$\Sigma F(x\to\pm\infty) = 0$$

ד. הכוח השקול הוא שלילי כאשר $x>0$, וחיובי כאשר $x<0$. הגרף הבא מתאר באופן איכותי את הכוח השקול כפונקציה של x:



ה.

(1) נשתמש בחוק שימור האנרגיה בין נקודת ההתחלה והנקודה $x=0$:

$$U_1 + E_{K1} = U_2 + E_{K2}$$

$$2\frac{k(-q)Q}{\sqrt{a^2+(0.75a)^2}} + 0 = 2\frac{k(-q)Q}{a} + \tfrac{1}{2}mv^2$$

$$-2\frac{kqQ}{1.25a} = -2\frac{kqQ}{a} + \tfrac{1}{2}mv^2$$

$$\Rightarrow \tfrac{1}{2}mv^2 = 0.4\frac{kqQ}{a} \qquad \Rightarrow v = \pm\sqrt{\frac{0.8kqQ}{ma}}$$

(2) אפשר לענות על סעיף זה בשתי גישות. הראשונה, לפיה הכוח השקול הפועל על החלקיק הוא שלילי במהלך תנועתו מ-$x=0.75a$ עד ל-$x=0$, ולאחר מכן הוא נעשה חיובי. כלומר, החלקיק נע בתאוצה עד $x=0$, ולאחר שהוא עובר נקודה זו הוא ממשיך בתאוטה. המשמעות היא שהחלקיק מגיע למהירותו המקסימלית ב-$x=0$.

גישה אחרת מתבססת על חוק שימור האנרגיה. מאחר שלאורך כל המסלול מתקיים $E_K + U = \text{constant}$, אזי לאנרגיה הקינטית של החלקיק יש ערך מקסימלי בנקודה שבה יש לאנרגיה הפוטנציאלית החשמלית שלו ערך מינימלי. בגלל שהאנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של החלקיק נתונה על ידי:

$$U = -2\frac{kqQ}{\sqrt{a^2+x^2}}$$

נקבל שהערך המינימלי של ביטוי זה, שהוא שלילי $(U<0)$, הוא כאשר המכנה הוא מינימלי, וזה קורה ב-$x=0$, לכן בנקודה זו יש לאנרגיה הקינטית ערך מקסימלי.

(3) נשתמש בחוק שימור האנרגיה של החלקיק בין נקודת ההתחלה $x_1 = 0.75a$ ונקודת העצירה הרגעית x_2:

$$U_1 + E_{K1} = U_2 + E_{K2}$$

$$2\frac{k(-q)Q}{\sqrt{a^2+(0.75a)^2}} + 0 = 2\frac{k(-q)Q}{\sqrt{a^2+x_2^2}} + 0$$

$$\Rightarrow \sqrt{a^2+x_2^2} = \sqrt{a^2+(0.75a)^2}$$

$$\Rightarrow x_2^2 = (0.75a)^2$$

$$\Rightarrow x_2 = \pm\sqrt{(0.75a)^2} = \pm 0.75a$$

בוחרים בסימן השלילי: $x_2 = -0.75a$.

(4) החלקיק מתחיל לנוע ממנוחה מהנקודה $(0.75a,0)$ בתאוצה (לא קבועה) בכיוון השלילי של ציר x עד שהוא מגיע למהירות מקסימלית בנקודה $(0,0)$. לאחר נקודה זו, החלקיק ממשיך לנוע בכיוון השלילי של ציר x אבל בתאוטה עד לעצירה רגעית בנקודה $(-0.75a,0)$. לאחר מכן הוא חוזר בתאוצה בכיוון החיובי ומגיע שוב למהירות מקסימלית בנקודה $(0,0)$. לאחר נקודה זו החלקיק ממשיך לנוע בתאוטה בכיוון החיובי של ציר x עד שהוא נעצר רגעית בנקודה $(0.75a,0)$. תנועה זו חוזרת על עצמה באופן מחזורי.

בקיצור, תנועת החלקיק היא תנועה מחזורית בין הנקודות $(0.75a,0)$ ו-$(-0.75a,0)$.

פתרון בעיה 40/ פרק 1

קודם כל יש לשים לב שההתנגשות בין הפרוטון ויון ההליום היא לא התנגשות פיזית, אלא כזו הנוצרת מהפעלת כוחות ממרחק (בעצם כל ההתנגשויות, בסופו של דבר, הן כאלה).

המרחק המינימלי בין הפרוטון ויון ההליום במהלך ההתנגשות מתקבל ברגע שבו יש לפרוטון וליון ההליום מהירות זהה u. משימור התנע מתקיים:

$$m_p v_{p1} + 0 = \left(m_p + m_{\text{He}}\right)u$$

$$\Rightarrow m_p v_{p1} + 0 = \left(m_p + 4m_p\right)u$$

ממשוואה זו נקבל שהמהירות המשותפת היא:

$$(1)\quad u = 0.2v_{p1}$$

כאשר $v_{p1} = 6\times10^4\ \text{m/s}$.

מצד שני מחוק שימור האנרגיה בין המצב ההתחלתי למצב בו החלקיקים התקרבו למרחק המינימלי נקבל:

$$U_1 + E_{K1} = U_2 + E_{K2}$$

$$\Rightarrow 0 + \tfrac{1}{2}m_p v_{p1}^2 = \frac{kq_p q_{\text{He}^{+2}}}{r_{\min}} + \tfrac{1}{2}(m_p + m_{\text{He}})u^2$$

$$\Rightarrow \tfrac{1}{2}m_p v_{p1}^2 = \frac{k(e)(2e)}{r_{\min}} + \tfrac{1}{2}(m_p + 4m_p)\left(0.2v_{p1}\right)^2$$

$$\Rightarrow 0.4m_p v_{p1}^2 = \frac{2ke^2}{r_{\min}}$$

$$\Rightarrow r_{\min} = \frac{ke^2}{0.2m_p v_p^2} = \frac{9\times10^9\left(1.6\times10^{-19}\right)^2}{0.2\left(1.672\times10^{-27}\right)\left(6\times10^4\right)^2} =$$

$$= 1.9\times10^{-10}\ \text{m} = 1.9\,\text{Å}$$

כאשר $\text{Å} = 10^{-10}\ \text{m}$ (אנגסטרום).

פתרון בעיה 41/ פרק 1

א. מתקיים:

$$F_x = 0$$

$$F_y = q_e E_y = \left(-1.6\times10^{-19}\right)\left(-10^2\right) =$$

$$= 1.6\times10^{-17}\ \text{N}$$

שימו לב! הצבנו את השדה בערך שלילי בגלל שהוא מכוון לכיוון השלילי של ציר ה- y.

מכאן נקבל:

$$a_x = 0$$

$$a_y = \frac{F_y}{m_e} = \frac{1.6\times10^{-17}\ \text{N}}{9.11\times10^{-31}\ \text{kg}} = 1.75\times10^{13}\ \text{m/s}^2$$

ב. מתקיים:

$$x = \cancel{x_0} + v_{0x}t = v_0 t$$

$$y = \cancel{y_0} + \cancel{v_{0y}t} + \tfrac{1}{2}a_y t^2 = \tfrac{1}{2}a_y t^2$$

מהמשוואה הראשונה מתקבל: $t = x / v_0$. נציב במשוואה השנייה ונקבל:

$$y = \tfrac{1}{2}a_y (x / v_0)^2 = \left(\frac{a_y}{2v_0^2}\right)x^2 = \left(\frac{e|E|}{2v_0^2}\right)x^2$$

זוהי משוואת פרבולה.

ג. מתקיים: $y_B = 2\times10^{-3}\ \text{m}$. על מנת לחשב את x_B, נחשב קודם את הזמן, t_B, שלוקח לאלקטרונים להגיע מהנקודה A אל הנקודה B, וזאת על ידי הצבת $y_B = 2\times10^{-3}\ \text{m}$ במשוואה עבור y:

$$2\times10^{-3} = \tfrac{1}{2}\left(1.75\times10^{13}\right)t_B^2$$

$$\Rightarrow t_B = 1.51\times10^{-8}\ \text{s}$$

מכאן נקבל:

$$x_B = v_0 t_B = 10^6\left(1.51\times10^{-8}\right) =$$

$$= 0.0151\,\text{m} = 1.51\,\text{cm}$$

ד.

$$v_{Bx} = 10^6\ \text{m/s}$$

$$v_{By} = v_{0y} + a_y t =$$

$$= 0 + (1.75\times10^{13})(1.51\times10^{-8}) =$$

$$= 2.6425\times10^5\ \text{m/s}$$

$$\Rightarrow v_B = \sqrt{v_{Bx}^2 + v_{By}^2} = 1.034\times10^6\ \text{m/s}$$

$$\tan\alpha_B = v_{By} / v_{Bx} = 0.264 \quad \Rightarrow \alpha_B = 14.8^\circ$$

ה. מהירות הכניסה המינימלית של האלקטרונים המאפשרת את יציאתם מבין הלוחות היא המהירות שעבורה האלקטרונים יוצאים מהקצה C של הלוח העליון. מתקיים $t_C = t_B = 1.51\times10^{-8}\ \text{s}$, $x_C = 0.08\,\text{m}$ ומכאן נקבל:

$$x_C = v_{\min} t_C$$

$$\Rightarrow v_{\min} = \frac{x_C}{t_C} = \frac{0.08}{1.51\times10^{-8}} = 5.3\times10^6\ \text{m/s}$$

ו. מתקיים:

$$v_{Cy} = v_{By} = 2.6425\times10^5\ \text{m/s}$$

$$v_{Cx} = v_{\min} = 5.3\times10^6\ \text{m/s}$$

מכאן:

$$\tan\alpha_C = \frac{v_{Cy}}{v_{Cx}} = \frac{2.6425\times10^5\ \text{m/s}}{5.3\times10^6\ \text{m/s}} = 0.05$$

$$\Rightarrow \alpha_C = 2.85^\circ$$

פתרון בעיה 42/ פרק 1

א. רכיב מהירות האלקטרונים בכיוון ציר x אינו משתנה והוא שווה ל-$v_0 = 8\times10^6\ \text{m/s}$. מכאן:

$$t_{AB} = \frac{x}{v_0} = \frac{0.1}{8\times10^6} = 1.25\times10^{-8}\ \text{s}$$

ב. בכיוון ציר y מתקיים:

$$y = y_0 + v_{0y}t + \tfrac{1}{2}a_y t^2 = 0 + 0 + \tfrac{1}{2}a_y t^2$$

כאשר $t = t_{AB} = 1.25\times10^{-8}\ \text{s}$ מתקיים ש-$y = y_B = 0.002\ \text{m}$. נציב במשוואה האחרונה ונקבל:

$$0.002 = \tfrac{1}{2}a_y\left(1.25\times10^{-8}\right)^2$$

$$\Rightarrow a_y = 2.56\times10^{13}\ \text{m/s}^2$$

מצד שני לפי החוק השני של ניוטון נקבל:

$$a_y = \frac{F_y}{m_e} = \frac{q_e E}{m_e} = \frac{-eE_y}{m_e}$$

ולכן:

$$\frac{-eE_y}{m_e} = 2.56\times10^{13}\ \text{m/s}^2$$

$$\Rightarrow E_y = -\frac{\left(2.56\times10^{13}\right)\left(9.11\times10^{-31}\right)}{1.6\times10^{-19}} =$$

$$= -145.76\frac{\text{N}}{\text{C}}$$

השדה שהתקבל שלילי, לכן הוא מכוון בכיוון השלילי של ציר y. כמובן $E_x = 0$.

ג. $V = Ed = (145.76)(0.006) = 0.87\ \text{V}$

מכיוון שהשדה מכוון מהפוטנציאל הגבוה אל הנמוך, נקבל שלוח 1 נמצא בפוטנציאל הגבוה. ניתן לפתור סעיף זה (כולל הסימן) על ידי שימוש בקשר:

$$V_1 - V_2 = -E_y(y_1 - y_2) =$$

$$= -(-145.76)[0.003 - (-0.003)] = 0.87\ \text{V}$$

מכאן רואים שמתקיים $V_1 > V_2$.

ד.

$$v_{Bx} = v_0 = 8\times10^6\ \text{m/s}$$

$$v_{By} = v_{0y} + a_y t =$$

$$= 0 + (2.56\times10^{13})(1.25\times10^{-8}) =$$

$$= 320{,}000\ \text{m/s}$$

$$\Rightarrow v_B = \sqrt{v_{Bx}^2 + v_{By}^2} = 8.0064\times10^6\ \text{m/s}$$

$$\tan\alpha_B = v_{By}/v_{Bx} = 0.04$$

$$\Rightarrow \alpha_B = 2.3^\circ$$

ה.

(1) זמן התנועה מ-A אל B נתון על ידי: $t = x/v_{0x}$, ומכיוון ש-x לא השתנה והמהירות ההתחלתית גדלה פי שניים, נקבל שזמן תנועת האלקטרונים בין שני הלוחות קטן פי שניים.

(2) משתנה, בגלל ש-$v_{By} = a_y t$ והזמן t קטן פי שניים, לכן v_{By} קטן פי שניים.

(3) מתקיים: $y_B = \tfrac{1}{2}a_y t_B^2$. מכיוון ש-$a_y$ אינו משתנה, ו-t_B קטן פי שניים, וקבל ש-y_B קטן פי 4.

פתרון בעיה 43/ פרק 1

א. רכיב התאוצה בכיוון ציר x עבור שני סוגי החלקיקים הוא אפס, משום שכיוון הכוח השקול הוא בכיוון ציר y. מתקיים:

$$a_p = a_{py} = \frac{F_p}{m_p} = \frac{eE}{m_p}$$

$$a_\alpha = a_{\alpha y} = \frac{F_\alpha}{m_\alpha} = \frac{2eE}{4m_p} = \frac{eE}{2m_p}$$

$$\Rightarrow \frac{a_p}{a_\alpha} = 2$$

ב. על פי הסעיף הקודם, תאוצת הפרוטון גדולה פי 2 מתאוצת חלקיק ה-α, לכן מתקיים $t_p < t_\alpha$. על מנת לחשב את היחס בין זמנים אלה נשתמש בקשר:

$$y = \cancel{y_0} + \cancel{v_{0y}t} + \tfrac{1}{2}a_y t^2 = \tfrac{1}{2}a_y t^2$$

נציב $d/2$ ונקבל:

$$\tfrac{1}{2}d=\tfrac{1}{2}a_y t^2 \quad \Rightarrow t=\sqrt{\frac{d}{a_y}}$$

מכאן נקבל:

$$t_p=\sqrt{\frac{d}{a_p}}$$

$$t_\alpha=\sqrt{\frac{d}{a_\alpha}}$$

$$\Rightarrow \frac{t_p}{t_\alpha}=\sqrt{\frac{a_\alpha}{a_p}}=\frac{1}{\sqrt{2}}$$

כאשר הצבנו $a_\alpha/a_p=1/2$ וזה לפי סעיף א'.

ג.

(1) מתקיים:

$$x_p=v_p t_p$$

$$x_\alpha=v_\alpha t_\alpha$$

$$\Rightarrow \frac{x_p}{x_\alpha}=\frac{\cancel{v_p}t_p}{\cancel{v_\alpha}t_\alpha}=\frac{t_p}{t_\alpha}=\frac{1}{\sqrt{2}}$$

(2) כעת מתקיים:

$$\tfrac{1}{2}m_p v_p^2=\tfrac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2$$

$$\Rightarrow \tfrac{1}{2}m_p v_p^2=\tfrac{1}{2}(4m_p)v_\alpha^2 \quad \Rightarrow v_p=2v_\alpha$$

לכן נקבל:

$$x_p=v_p t_p$$

$$x_\alpha=v_\alpha t_\alpha$$

$$\Rightarrow \frac{x_p}{x_\alpha}=\frac{v_p t_p}{v_\alpha t_\alpha}=2\frac{1}{\sqrt{2}}=\sqrt{2}$$

ד. $v_y=\cancel{v_{0y}}+a_y t=a_y t$

לפי זה נקבל:

$$v_{yp}=a_p t_p$$

$$v_{y\alpha}=a_\alpha t_\alpha$$

$$\Rightarrow \frac{v_{yp}}{v_{y\alpha}}=\frac{a_p t_p}{a_\alpha t_\alpha}=\left(\frac{a_p}{a_\alpha}\right)\left(\frac{t_p}{t_\alpha}\right)=(2)\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)=\sqrt{2}$$

וזאת כשהשתמשנו בתוצאות מהסעיפים הקודמים: $t_p/t_\alpha=1/\sqrt{2}$ ו-$a_p/a_\alpha=2$.

ה. על מנת להתקיים: $x_p=x_\alpha$ צריך להתקיים:

$$v_p t_p=v_\alpha t_\alpha \quad \Rightarrow \frac{v_p}{v_\alpha}=\frac{t_\alpha}{t_p}=\sqrt{2}$$

כאשר השתמשנו בתוצאה מסעיף ב':

$t_\alpha/t_p=\sqrt{2}$.

פתרון בעיה 44/ פרק 1

א. מתקיים עבור חלקיק α:

$$a_x=0$$

$$a_y=\frac{q_\alpha E}{m_\alpha}=\frac{2eE}{4m_p}=\frac{eE}{2m_p}$$

שים לב! E במשוואה האחרונה הוא שלילי מכיוון שהוא מכוון בכיוון השלילי של ציר y.

הערך הגדול ביותר עבור הזווית β שעבורו חלקיק α אינו מתנגש בלוח העליון הוא זה שמתקיים עבורו $\Delta y=5\,\text{cm}$. על סמך זה ניתן לחשב את הערך המקסימלי עבור v_{0y}:

$$\Delta y=\frac{0-v_{0y}^2}{2a}=\frac{-v_{0y}^2}{2\left(eE/2m_p\right)}=0.05$$

$$\Rightarrow v_{0y}=\sqrt{-\frac{eE\Delta y}{m_p}}=$$

$$=\sqrt{-\frac{(1.6\times10^{-19})(-10^4)(0.05)}{1.672\times10^{-27}}}=$$

$$=2.18\times10^5\ \text{m/s}$$

$$\Rightarrow \sin\beta_{\max}=\frac{v_y}{v}=\frac{2.18\times10^5}{6\times10^5}=0.3645$$

$$\Rightarrow \beta_{\max}=21.38^\circ$$

ב. מתקיים: $y_B=-0.01\,\text{m}$. על מנת לחשב x_B, נחשב קודם את הזמן מ-A אל B (t_{AB}):

$$y_B=v_{0y}t_{AB}+\tfrac{1}{2}a_y t_{AB}^2$$

כאשר:

$$a_y=\frac{eE}{2m_p}=\frac{\left(1.6\times10^{-19}\right)\left(-10^4\right)}{2\left(1.672\times10^{-27}\right)}=$$

$$=-4.78\times10^{11}\ \text{m/s}$$

נציב במשוואה הנ"ל ונקבל:

$$-0.01=2.18\times10^5 t_{AB}+\tfrac{1}{2}\left(-4.78\times10^{11}\right)t_{AB}^2$$

$$\Rightarrow t_{AB}^2-9.12\times10^{-7}t_{AB}-4.18\times10^{-14}=0$$

$$\Rightarrow t_{AB}=9.55\times10^{-7}\ \text{s}$$

מכאן נקבל:

$$x_B = (v_0 \cos\beta)t_{AB} =$$
$$= \left(6\times10^5 \cos 21.38\right)\left(9.55\times10^{-7}\right) = 0.533\,\text{m}$$

ג.

$$v_{Bx} = v_{0x} = 6\times10^5 \cos 21.38 = 5.587\times10^5\ \text{m/s}$$
$$v_{By} = v_{0y} + a_y t_{AB} =$$
$$= 6\times10^5 \sin 21.38 - 4.78\times10^{11}\left(9.55\times10^{-7}\right) =$$
$$= -2.38\times10^5\ \text{m/s}$$

מכאן נקבל:

$$v_B = \sqrt{\left(5.587\times10^5\right)^2 + \left(-2.38\times10^5\right)^2} =$$
$$= 6.07\times10^5\ \text{m/s}$$
$$\tan\beta_B = \frac{-2.38\times10^5}{5.587\times10^5} = -0.426$$
$$\Rightarrow \beta_B = -23.07^\circ$$